JUNIO 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUCION
¿Por qué comemos lo que comemos?

COSMOLOGIA
Cuestiones y retos fundamentales

BIOLOGIA
Función ecológica de las trufas

NEUROCIENCIA
Cuando los circuitos neuronales fallan

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

INFORME ESPECIAL

SALVAR LA TIERRA



- Límites de un planeta sano
- Soluciones para las amenazas ambientales
- El fin del crecimiento

00405
9 770210 136004

SUMARIO

Junio de 2010/ Número 405



¿Qué veríamos si pudiéramos llegar a Saturno, Júpiter o las lunas de Neptuno?



Muchas enfermedades antaño consideradas "mentales" cuentan en realidad con una causa biológica.



Las trufas, hongos hipogeos, dependen de los animales para dispersar sus esporas.

ARTICULOS

ASTRONOMIA

16 Ocho maravillas del sistema solar

Edward Bell y Ron Miller

Una recreación artística de algunos de los paisajes más sobrecogedores del sistema solar.

NEUROCIENCIA

24 Circuitos defectuosos

Thomas R. Insel

La neurociencia está revelando las conexiones neurales defectuosas que dan lugar a los trastornos psicológicos.

ECOLOGIA

32 La vida secreta de las trufas

James M. Trappe y Andrew W. Claridge

Más allá del refinamiento gastronómico, las trufas desempeñan funciones ecológicas esenciales.

INFORME ESPECIAL: SOSTENIBILIDAD

45 Vivir en una Tierra nueva

46 Límites de un planeta sano

Jonathan Foley

Soluciones para las amenazas ambientales

53 El fin del crecimiento

Bill McKibben

58 Entrevista a Bill McKibben: ¿De veras necesitamos un crecimiento cero?

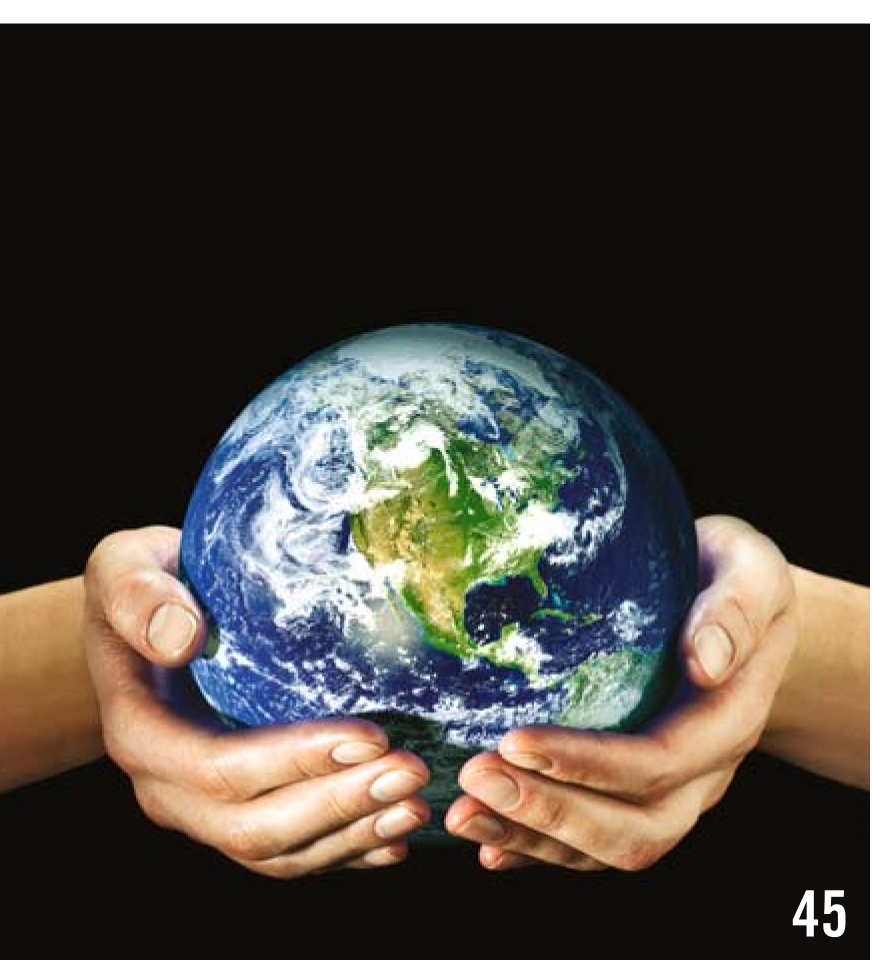
Mark Fischetti

COSMOLOGIA

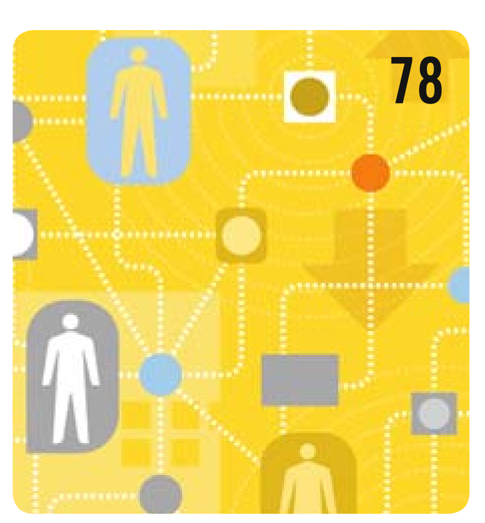
60 Cuestiones fundamentales de cosmología

Peter Schneider

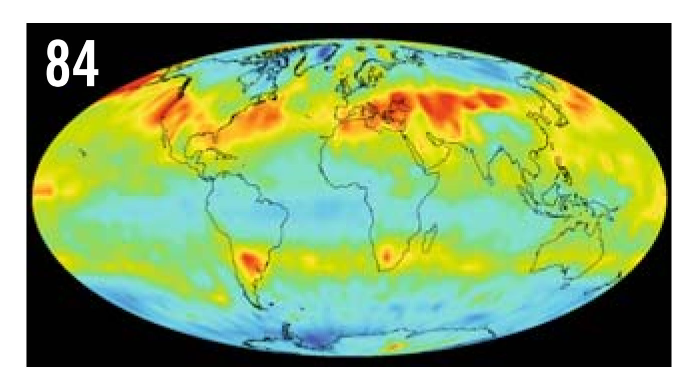
¿De qué se compone la materia oscura? ¿Qué es la energía oscura? Los cosmólogos aspiran a responder a estas cuestiones antes del año 2020.



Traspasar ciertos límites ambientales conlleva alteraciones a veces irreversibles en nuestro planeta.



Las redes "ad hoc" se forman y reestructuran solas.



El Niño constituye el fenómeno acoplado océano-atmósfera más importante para la variabilidad interanual del clima.

EVOLUCION

69 Genes, cultura y dieta

Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo

Biología y cultura interaccionan en el desarrollo de nuestros hábitos alimentarios.

COMUNICACIONES

78 Redes inalámbricas instantáneas

Michelle Effros, Andrea Goldsmith y Muriel Médard

Las redes inalámbricas independientes de una estructura fija facilitarían una conectividad permanente y ubicua.

CLIMA

84 Cambio de las temperaturas global y hemisférica

Carlos Gay García y Francisco Estrada

Los métodos econométricos alertan sobre los riesgos de la intervención humana en el sistema climático.

SECCIONES

3 CARTAS AL DIRECTOR

4 HACE...
50, 100 y 150 años.

5 APUNTES
Antropologíal... Física... Altas energías... Reptiles... Paleontología.

8 CIENCIA Y SOCIEDAD
El telescopio Fermi... Envenenamiento por mordedura de serpiente... Calidad del aire urbano... Estomas y canales de aniones... Predecir el éxito de las especies invasoras.

40 DE CERCA
Nacimiento de una salamandra, por *Eduardo Obis*

42 DESARROLLO SOSTENIBLE
Las redes contra la pobreza, por *Jeffrey D. Sachs*

43 CIENCIA Y GASTRONOMIA
El hidromiel, por *Pere Castells*

90 CURIOSIDADES DE LA FISICA
Caprichos de la reflexión, por *Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik*

92 JUEGOS MATEMATICOS
Computación cuántica, por *Agustín Rayo*

94 LIBROS
Filosofía de la física

INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Ocho maravillas del sistema solar*; Juan Manuel González Mañas: *Circuitos defectuosos*; Luis Bou: *Vivir en una Tierra nueva, Límites de un planeta sano* y *Soluciones para las amenazas ambientales*; I. Nadal y Yago Ascasibar: *Cuestiones fundamentales de cosmología*; Marián Beltrán: *Genes, cultura y dieta* y *Desarrollo sostenible*; J. Vilardell: *Redes inalámbricas instantáneas, Hace...* y *Curiosidades de la física*; Bruno Moreno: *Apuntes*



Portada: Aaron Goodman

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono: 934 143 344
Fax: 934 145 413
e-mail: administracion@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Alternativas a la energía oscura

“Energía oscura o vacío cósmico” por Timothy Clifton y Pedro G. Ferreira (junio de 2009) sugiere que la aparente expansión acelerada del universo podría ser un concepto erróneo causado por hallarnos en el centro de un gigantesco vacío cósmico (en el que el ritmo de expansión variaría con la posición, de modo que la energía oscura sería innecesaria).

La prueba de la acelerada o desigual expansión del universo es que las supernovas distantes se ven más tenues de lo esperado. Pero, ¿sería imputable la disminución de brillo a una neblina difusa aunque uniforme de partículas individuales? El fondo cósmico de microondas podría también estar causado por la medición de la temperatura y distribución de esa neblina.

Bill Manzke
Dublín, Ohio

Otra explicación de la pérdida de brillo de las supernovas podría ser que la luz se desacelera con el tiempo. Si la luz se hubiera propagado con mayor rapidez en el pasado, habría llegado más lejos de lo que creemos y su intensidad sería menor que la esperada.

Joel Sanet
Miami

RESPONDEN LOS AUTORES: *Los astrónomos suelen llamar “polvo” a lo que Manzke denomina “neblina”. Miríadas de polvo interpuesto entre nosotros y las supernovas podrían enturbiar las imágenes que medimos con los telescopios. Pero ello implicaría que las supernovas distantes parecerían sistemáticamente más tenues conforme miráramos más y más lejos. Ello nos sirve de prueba, porque si nos retrotraemos suficientemente en el tiempo, el universo no se estaría acelerando (o bien las supernovas no estarían en el vacío), de tal manera que no se produciría la sistemática pérdida de brillo que se asocia a una neblina. Además, si la absorción por el polvo fuera notable, modificaría el espectro de la luz que recibimos. Los astrónomos comprueban si ello sucede de veras.*

Que el polvo caliente sea el origen del fondo cósmico de microondas es una hipótesis interesante, pero escasamente verosímil. La radiación de fondo de microondas se distribuye con uniformidad casi perfecta por todo el firmamento y sus propiedades demuestran que proviene de una fuente en perfecto equilibrio térmico. Si se estuviera emitiendo desde el polvo, su espectro sería muy distinto; muy raramente presentaría una distribución tan uniforme.

En cuanto a la carta de Sanet, el valor constante de la velocidad de la luz constituye el corazón de la teoría de la relatividad y la base de las modernas teorías cuánticas de las fuerzas fundamentales. A pesar de ello, algunos investigadores han explorado la posibilidad de que la velocidad de la luz pudiera variar a escalas de tiempo cosmológicas. Ello repercutiría en problemas cosmológicos; algunos lo han utilizado para intentar explicar por qué el universo parece tan liso a escalas muy grandes. Pero es muy difícil edificar una teoría en la que pueda variar la velocidad de la luz. Por el momento, abundan los datos que apoyan la relatividad general. Esta es la teoría que predomina.

Gatos gregarios

“La domesticación del gato”, de Carlos A. Driscoll, Juliet Clutton-Brock, Andrew C. Kitchener y Stephen J. O’Brien (agosto de 2009) tiene escaso fundamento y yerra en lo que afecta al comportamiento social de los gatos domésticos. Los gatos viven en grupo si se les ofrece la oportunidad y en cada grupo hay una hembra matriarca y un macho alfa. Los gatos monteses siempre forman grupos (colonias); la gente que cuida de multitud de gatos se refiere a este tipo de jerarquía. En cuanto a su pretendidamente escasa utilidad, los autores deberían considerar que tienen la capacidad de controlar más de 40 huevos de numerosas especies de serpientes, sin hablar de los roedores, cuyos únicos otros depredadores son las aves de presa y las zarigüeyas.

“Gary in Tampa”
A través de Scientific American.com

RESPONDE DRISCOLL: *Parece que cierta frase ha causado confusión: la que afirmaba que “los felinos son cazadores solitarios”. En su lugar debería haberse escrito que “los gatos monteses son cazadores solitarios”. En la estructura social del gato montés influye fuertemente la disponibilidad de recursos. A menos que se alimenten de una fuente puntual (una señora amable o un montón de basura), estos felinos que se procuran su propia comida son solitarios. Ni siquiera los gatos bien socializados alcanzan el nivel de sociabilidad de los leones, que cazan de forma cooperativa. En cuanto a su utilidad, nunca se les ha educado para ningún tipo de “conducta” utilitaria (pastoreo de rebaños, vigilancia o caza), como se ha hecho con los perros.*

Se ha sugerido que las plagas que azotaron Europa en la Edad Media fueron consecuencia de la reducción de la población gatuna y del consiguiente aumento del número de ratas durante aquellos tiempos. Además, la vulnerabilidad de la población tuvo más que ver con la pequeña glaciación y la gran hambruna que entonces sobrevino —ocasionando cambios en la estructura social, hábitos de vida e higiene— y con la prevalencia de la rata negra (Rattus rattus). *Al mejorar el clima desaparecieron las plagas; ello permitió restaurar la productividad agrícola y dispersar los núcleos de población. Quizá lo más importante es que la rata negra fue sustituida por la rata marrón o gris* (Rattus norvegicus), *menos proclive a la infección. A veces se ha dicho que los gatos no tienen la capacidad de controlar epidemias porque éstas atacaron también lugares con una densidad gatuna elevada.*



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Acrobacias. «‘Poner un hombre en el espacio constituye una proeza acrobática: un hombre no hará más que un instrumento, de hecho hará menos.’ Esa fue la afirmación de Vannever Bush, presidente de la Junta de Gobierno del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en una declaración al Comité de la Cámara de Representantes para la Ciencia y la Astronáutica. ‘Hay cosas mucho más serias que unas cuantas cabriolas vistosas. Pero el pueblo estadounidense no aprecia tal diferencia. En este país solemos afanarnos, durante algún tiempo, por cualquier novedad. No desestimo del todo las ventajas de mostrar al mundo nuestras capacidades técnicas. Ni infravaloro los efectos morales de un programa fuera de lo corriente. Pero todo ese jaleo propagandístico del programa me deja completamente frío.’»

...cien años

Aguas curativas. «Se ha demostrado que casi todas las aguas minerales poseen emanación radiactiva. El hallazgo de la radiactividad como causa de los efectos beneficiosos de esas aguas llevó a pensar en el control artificial de esa propiedad. Se pretendía conferir efectos curativos a las aguas de manantial inactivas o mejorar la eficacia de los manantiales naturales. La idea de añadir cantidades variables de sustancias radiactivas ha sido puesta en práctica a gran escala por la administración de las salinas municipales de Bad Kreuznach (Alemania), donde se fabrica y vende agua potable y de aseo tratada artificialmente con las sustancias altamente radiactivas de los manantiales. Aunque es demasiado pronto para extraer conclusiones, la cura de aguas radiactivas es sin duda una valiosa aportación a los métodos actuales de la medicina moderna.»

Legalidad aérea. «Al anular la orden judicial dictada por el juez Hazle a favor de los hermanos Wright y en contra de Curtiss, y la orden similar del juez Hand contra Paulhan, el Tribunal de Apelaciones del distrito se ha limitado a seguir un precedente hace tiempo consolidado en la legislación sobre patentes. Curtiss ya había triunfado como aviador antes de que los hermanos Wright decidieran abandonar todo secretismo y mostrar al mundo qué género de máquina era aquella cuyas prestaciones habían ocultado con tanto empeño. También Blériot había estado experimentando sin rebozo antes del vuelo en público de los hermanos Wright. Sorprende que el tribunal de primera instancia no haya conseguido encontrar en esos hechos una base testimonial suficiente para denegar la concesión de un mandato judicial. Con la revocación del veredicto del tribunal de primera instancia por parte del de apelación, han desaparecido las trabas para el desarrollo de la aviación en este país.»

Una carrera emocionante. «El aviador Charles K. Hamilton realizó un atrevido y emocionante vuelo desde Nueva York a Philadelphia. El vuelo fue planeado por el *New York Times* y el *Philadelphia Public Ledger*. El piloto, portador de una carta de Gaynor, alcalde Nueva York, para Stuart, gobernador de Pensilvania, efectuó el vuelo en el tiempo previsto [*véase la ilustración*].»


SCIENTIFIC AMERICAN
A POPULAR ILLUSTRATED WEEKLY OF THE WORLD'S PROGRESS

LA AVIACION TOMA LA DELANTERA. En su biplano Curtiss, Charles K. Hamilton compite con el caballo de hierro, 1910.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CII, N.º 26; 25 DE JUNIO DE 1910

...ciento cincuenta años

Un Támesis hediondo. «El año pasado, como consecuencia de tres meses de sequía, el viejo padre Támesis —la memorable corriente que una vez fue— se convirtió en una gigantesca cloaca que despedía fétidos hedores por toda la metrópoli británica. En un informe recientemente presentado acerca del tema se afirma que al río se lanzaron, durante los meses de junio, julio y agosto, sustancias desodorizantes por valor de 88.000 dólares, principalmente hipoclorito de calcio, del que se usaron 478 toneladas, y cal, de la que se usaron 4280 toneladas. Se arrojaron principalmente en las alcantarillas y, a pesar de que la temperatura del agua permaneció alta (entre 20 y 23 grados), el río se mantuvo invulnerable a todos los intentos de desodorización. Este año se han realizado grandes preparativos para disponer de percloruro de hierro en cantidad suficiente y moderar la pestilente potencia del ‘frasco de las esencias’ del padre Támesis.»

Erratum corrige

En el artículo “Obtención de compuestos de potasio”, del mes de abril, en la página 91, se dice que la silvinita es un mineral, cuando en realidad se trata de una roca.

En el artículo “Las dificultades de la fusión nuclear”, del mes de mayo, en la página 31, aparece mal escrito el nombre de Lord Kelvin: debería decir William Thomson.

ANTROPOLOGIA CULTURAL

El origen de la cocina

Si no cociéramos los alimentos, tendríamos que pasar la mitad de nuestros días masticando comida cruda, igual que los chimpancés. Guisar los alimentos los hace más deliciosos, los reblandece y potencia su valor energético y nutritivo, al descomponer los almidones y las proteínas en moléculas más digeribles. Según Richard Wrangham, de la Universidad de Harvard, la mayor recompensa de cocinar es que nos deja más energía y tiempo libres para dedicarlos a otras tareas: alimentar un cerebro de mayor tamaño, establecer relaciones sociales y crear divisiones del trabajo. En última instancia, cocer los alimentos nos hace humanos [*véase* "Genes, cultura y dieta", por Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo, *en este mismo número*].

Los datos arqueológicos sobre el momento en que nuestros antepasados empezaron a controlar el fuego (prerrequisito para poder cocinar) son desiguales. Las pruebas biológicas, en cambio, son indiscutibles: debimos de disfrutar por primera vez del olor de un buen asado hace unos 1,9 millones de años. Ello coincide con la aparición de *Homo erectus*, una especie humana primitiva cuyo cráneo era un 50 por ciento mayor y cuya pelvis y caja torácica eran menores que sus ancestros, lo que indicaba un cerebro más voluminoso y un abdomen menor. Presentaban también dientes de tamaño inferior. Si aceptamos que la capacidad de cocinar debió dejar huellas en el registro fósil, este es el momento que estamos buscando. Ni antes ni después, en el curso de la evolución humana, cambiaron tanto los tamaños craneal y pélvico.



Wrangham ha elaborado una teoría sobre el modo en que se aprendió a controlar el fuego y, por consiguiente, a cocinar. Conjetura que los antepasados más cercanos a *H. erectus*, los australopitecos, comían carne cruda pero la golpeaban para aplanarla y hacerla más fácil de masticar. Y, ¿qué ocurre si intentamos aplastar carne con la ayuda de piedras? Que se producen chispas. Al repetir el proceso una y otra vez, uno acaba averiguando el modo de controlar el fuego.

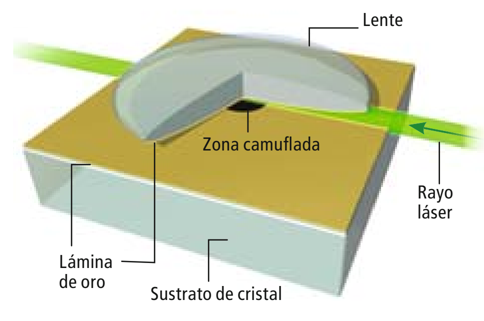
—Melinda Wenner

FISICA

Cómo tornarse invisible

En los últimos años han proliferado las ideas para fabricar capas de invisibilidad (sistemas de camuflaje que desvían la luz alrededor del objeto que se desea esconder). La mayoría se basan en metamateriales, estructuras con propiedades ópticas extrañas. Sin embargo, un nuevo dispositivo de camuflaje, más sencillo, podría convertir en innecesarios estos curiosos materiales.

Un grupo de investigadores de BAE Systems (Washington, D.C.), de las universidades Towson y Purdue ha diseñado un dispositivo de camuflaje basado en dos láminas de oro: una recubre una lente curva y otra descansa sobre una pieza plana de cristal. Entre ellas se forma una zona que opera a modo de guía de onda cónica. El truco está en el gradiente del índice de refracción del material, que permite que los rayos de luz paralelos a la pila formada por los materiales se desvíen alrededor de una zona central, como agua que fluye alrededor de una piedra.



LOS RAYOS LASER que inciden lateralmente en el dispositivo de camuflaje se curvan alrededor de un punto central, que se convierte en invisible.

Vladimir M. Shalaev, uno de los autores del trabajo, formó parte de un grupo que en 2007 diseñó, mediante metamateriales, una capa de luz visible. Sin embargo, dicha capa funcionaba sólo en una longitud de onda predeterminada y escondía una zona muy limitada. La guía de onda, en cambio, opera con múltiples longitudes de onda de luz visible y camufla una zona más extensa.

Pero presenta un inconveniente: oculta objetos bidimensionales y no tridimensionales; las cosas que uno querría esconder probablemente no estén limitadas a dos dimensiones. Aun así, el sistema podría resultar útil en las comunicaciones ópticas.

—John Matson

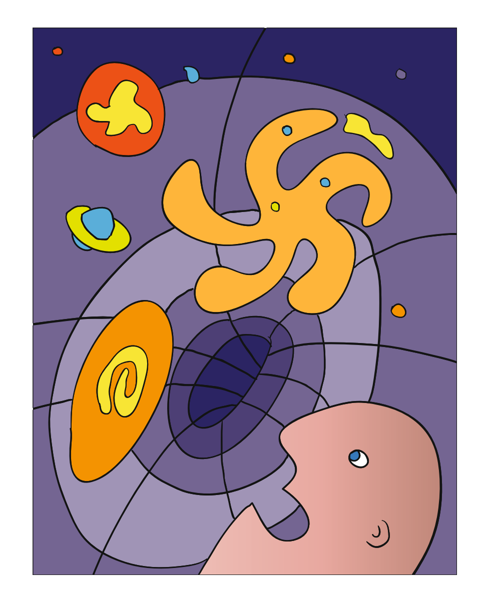
GETTY IMAGES (*relieve*); GEORGE RETSECK (*abajo*)

ALTAS ENERGIAS

Agujeros negros en colisiones de partículas

Desde hace tiempo se cree que las colisiones de partículas a muy alta energía deberían producir agujeros negros microscópicos. Sin embargo, hasta ahora nadie había logrado hallar soluciones de las ecuaciones de Einstein que describiesen el proceso. Recientemente, M. W. Choptuik, de la Universidad de Columbia Británica, y F. Pretorius, de la de Princeton, han hallado las primeras soluciones de esta clase. Su trabajo ha sido publicado en *Physical Review Letters* en marzo de 2010 y constituye un resultado de primer orden: lo que hasta ahora era una conjetura pasa a convertirse en una predicción de la relatividad general.

Se desconoce cuánta energía haría falta para desencadenar el proceso, pero los cálculos de Choptuik y Pretorius indican que el mismo podría verse en el LHC del CERN si la energía necesaria no excediese unas pocas decenas de TeV, algo que predicen algunas teorías. En caso de generarse, estos agujeros negros microscópicos se desintegrarían casi instantáneamente.



REPTILES

Serpiente gigante

Se han hallado los restos fosilizados de la mayor serpiente conocida: 13 metros de longitud y más de una tonelada de peso. *Titanoboa cerrejonensis*, prima de la boa constrictor, vivió hace unos sesenta millones de años en una selva neotropical, en lo que hoy es la zona nororiental de Colombia.

Amén de ampliar los nuestros conocimientos sobre la biología herpetológica, esta serpiente prehistórica nos ofrece indicios sobre el clima de la selva primitiva. Puesto que las serpientes y otros reptiles son poiquilotermos (de sangre fría), su temperatura corporal y procesos vitales dependen de la temperatura del aire circundante. Cuanto más caliente está el aire, más crecen.

Jason J. Head, de la Universidad de Toronto, y sus colaboradores calculan que, para alcanzar su enorme tamaño corporal (que supera en casi tres metros a la poseedora del récord en tiempos modernos, una pitón reticulada), la *Titanoboa* tendría que haber vivido en un entorno con una temperatura media anual de al menos entre 30 y 34 °C, es decir, más caliente que la temperatura media actual del trópico (entre 24 y 26 °C).

Algunos modelos climáticos sugieren que las zonas ecuatoriales han estado resguardadas de los efectos de las fases de “invernadero” naturales del planeta, pero el hallazgo de la *Titanoboa* muestra que, durante estas fases, los lugares con un clima ya cálido se hicieron más calurosos todavía. De hecho, poco después del período al que corresponde la *Titanoboa*, puede que la temperatura tropical subiera tanto, que causara muertes generalizadas por causa del calor, aunque aún no se han hallado pruebas de los efectos de ese episodio abrasador.

—*Kate Wong*

1. LA ENORME VERTEBRA del fósil de *Titanoboa*, una serpiente de trece metros de longitud, empequeñece la vértebra de una anaconda moderna, de 5,2 metros.



2. *TITANOBOA* debió alimentarse de cocodrilos y otros vertebrados que compartían su hábitat tropical.

PALEONTOLOGIA

¿Artistas neandertales?

Desde hace decenios, se vienen recuperando en Oriente Próximo y en Africa ornatos corporales fabricados con conchas pintadas y perforadas de entre 70.000 y 120.000 años de antigüedad. Se consideran indicios de pensamiento simbólico entre los primeros humanos modernos.

La ausencia de hallazgos similares en Europa cuando ésta era territorio neandertal ha abonado la idea de que nuestros parientes primitivos carecían de pensamiento simbólico, una posible señal de inferioridad mental que ayudaría a explicar por qué *Homo sapiens* terminó por sustituirlos. Aunque se han descubierto algunos indicios de arte y joyas neandertales (colgantes hechos con dientes de animales perforados y con ranuras), a menudo se han desechado por considerarse una mezcla de elementos humanos modernos o imitaciones.

Sin embargo, João Zilhão, de la Universidad de Bristol, y sus colaboradores han encontrado en dos cuevas de Murcia joyas de 50.000 años de antigüedad (10.000 años antes de que los humanos modernos llegasen a Europa). La Cueva Antón contenía una concha perforada de vieira, pintada con un pigmento naranja formado por goethita amarilla y hematita roja, recogidas a unos cinco kilómetros del lugar. Entre el material desenterrado en la Cueva de los Aviones, junto a herramientas de cuarzo y pedernal, se encontraron dos conchas de mejillón perforadas y pintadas con restos de hematita roja. No se hallaron tintes en las conchas dedicadas a la comida ni en los útiles líticos, lo que sugiere que las joyas no se pintaron de forma aleatoria.

Esos hallazgos, junto con elementos descubiertos anteriormente, indican que los neandertales poseían la misma capacidad de simbolismo, imaginación y creatividad que los humanos modernos. Erik Trinkaus, de la Universidad de Washington en St. Louis, espera que los descubrimientos comiencen a enterrar la hipótesis que viene defendiéndose desde hace años: a saber, que los neandertales se extinguieron porque eran menos inteligentes. Las joyas implican también que los neandertales podrían haber enseñado a nuestros antepasados a pintar..., o viceversa.

—Charles Q. Choi



LA PINTURA NEANDERTAL se aprecia en esta imagen compuesta de una concha de vieira. La parte exterior (*derecha*) muestra restos de pintura naranja. La coloración pretendía quizá recuperar la apariencia original de la concha o remedar el rojo natural de su interior (*izquierda*).

CORTESIA DE JOÃO ZILHÃO *Universidad de Bristol (concha)*; GETTY IMAGES *(basalto)*

EFECTO INVERNADERO

Confinamiento del carbono

Absorber el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero de las chimeneas y depositarlos bajo tierra constituye una técnica clave para combatir el cambio climático. Pero, ¿cuál es el mejor lugar para almacenar el CO_2? Estudios recientes indican que una de las mejores opciones sería la roca volcánica junto a la costa este de los Estados Unidos.

El basalto no sólo almacena el CO_2, sino que además forma, a partir del mismo gas y en un período de tiempo corto, rocas carbonatadas (piedra caliza). Asimismo, el basalto costero tiene el beneficio añadido de hallarse cubierto por el océano, que actúa como una segunda barrera de protección contra las fugas de CO_2.



ESPONJA PARA GASES DE EFECTO INVERNADERO: el basalto convierte el CO_2 en rocas carbonatadas. Este abundante material volcánico resulta, ciertamente, un lugar óptimo para la captura de carbono.

Las investigaciones dirigidas por David S. Goldberg, de la Universidad de Columbia, ya habían mostrado la existencia de basalto bajo el océano frente a la costa oeste, en la zona de California, Oregón y Washington. El trabajo más reciente de su grupo, publicado en el número en línea del 4 de enero de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, ha localizado extensos depósitos de basalto al este de EE.UU, frente a las costas de Georgia, Massachusetts, Nueva Jersey, Nueva York y Carolina del Sur. Una formación cercana a Nueva Jersey contendría hasta mil millones de toneladas métricas de CO_2. No hay que olvidar, sin embargo, que se emiten un total de más de 30.000 millones de toneladas métricas de CO_2 al año.

Si se demostrase que el CO_2 permanece bajo tierra (se están llevando a cabo experimentos en ese sentido frente a las costas de Oregón y en Islandia), el basalto ganaría importancia, dado que se halla muy extendido en el planeta: las trampas de basalto siberianas y las llanuras del Decán, en la India, ofrecen una buena muestra de ello.

—David Biello

El telescopio Fermi cumple dos años

Las explosiones cósmicas de rayos gamma constituyen las emisiones electromagnéticas más luminosas del universo. Su comprensión es clave en cosmología y física de partículas

El próximo 11 de junio de 2010 se cumplirán dos años de la puesta en órbita del telescopio Fermi, diseñado por la NASA para estudiar las fuentes de rayos gamma del universo. Este telescopio debe su nombre al premio Nobel Enrico Fermi (1901-1954), quien explicó el mecanismo de aceleración de los rayos cósmicos.

El telescopio Fermi lleva a bordo dos instrumentos: el LAT (Large Area Telescope) y el GBM (Gamma-ray Burst Monitor). El LAT está diseñado para detectar rayos gamma con energías comprendidas entre 20 MeV y 300 GeV (los fotones de la luz visible tienen una energía de unos pocos electronvolt). El GBM, que cubre el rango de 8 KeV a 30 MeV, permite la detección de estallidos de rayos gamma asociados a fotones menos energéticos.

El objetivo consiste en elaborar un mapa detallado de las fuentes de rayos gamma existentes en el universo. En sus primeros dos años de observaciones, el telescopio Fermi ha superado la sensibilidad de sus predecesores, hasta el punto de generar un mapa pormenorizado de las 1451 fuentes de rayos gamma más brillantes que se conocen.

La mayoría de estas fuentes (689) corresponden a galaxias activas (también denominadas AGN, siglas en inglés de "núcleo galáctico activo"). Las AGN son galaxias que emiten con una luminosidad mayor de la habitual en algún rango del espectro. Las AGN cuentan con una particular relevancia en astrofísica, ya que dichas emisiones obedecen a la presencia de agujeros negros supermasivos en el centro de dichas galaxias.

Entre otras fuentes de interés podemos citar 56 púlsares (estrellas de neutrones que giran rápidamente); tres sistemas binarios formados por una estrella de gran masa en torno a un objeto compacto (un agujero negro o una estrella de neutrones), y el cúmulo globular 47 Tucanae. Cabe destacar que 630 fuentes aún no han podido ser identificadas plenamente.

Agujeros negros, púlsares y materia oscura

Hasta el momento, las aportaciones científicas del Fermi son impresionantes. Un primer análisis de los datos ofrece algunas pistas sobre la evolución de los agujeros negros supermasivos que habitan en el centro de las galaxias activas. Los resultados sugieren que estos objetos generarían menos rayos gamma a medida que envejecieran. Sin embargo, aún necesitamos observaciones más detalladas que nos permitan entender el mecanismo responsable de tal comportamiento.

Otro hallazgo importante ha sido la detección de 56 nuevos púlsares gracias a la precisión temporal del Fermi (1 microsegundo), que permite la detección y medición del período de rotación de tales objetos. Algunos de los púlsares más fascinantes son los denominados PSR J0007+7303 (conocido como CTA 1) y PSR J1836+5925 que, a diferencia de la gran mayoría, emiten la mayor parte de su energía en forma de rayos gamma, con emisiones casi nulas en las longitudes de ondas de radio.

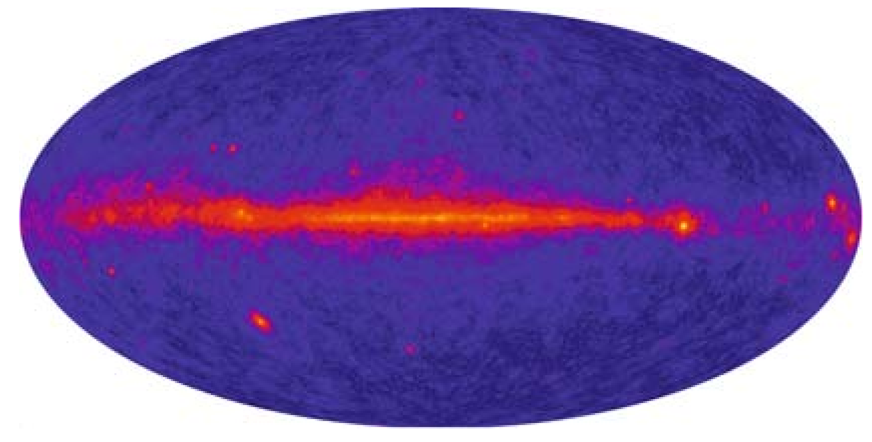
El estudio de los parámetros específicos derivados de estas observaciones nos permitirán evaluar los diferentes modelos teóricos que han sido propuestos para explicar la generación de rayos gamma en los púlsares.

Sin embargo, los avances más significativos del Fermi probablemente estén aún por llegar. En particular, el telescopio podría detectar la energía liberada en la aniquilación de partículas y antipartículas de materia oscura. Se estima que la materia oscura constituye en torno al 80 por ciento de toda la materia del universo (cantidad que equivale a un 23 por cierto de su energía total; la materia ordinaria sólo representa un 4 por ciento). Si bien la existencia de materia oscura puede inferirse a partir de sus efectos gravitatorios, su composición sigue siendo un misterio: sólo sabemos que ha de ser distinta de la materia hasta ahora conocida. Su detección constituiría un acontecimiento de consecuencias extraordinarias para la física fundamental.

Asimismo, entre las 630 fuentes sin identificar descubiertas por el telescopio Fermi podrían detectarse nuevos emisores de rayos gamma, como estrellas binarias supermasivas o cúmulos de galaxias.

Estos son sólo algunos de los descubrimientos que quizá veamos en los próximos años. En cualquier caso, la identificación de nuevas fuentes de rayos gamma deparará un gran número de sorpresas. El futuro luce brillante para este potente telescopio.

Néstor Mirabal Barrios
Dpto. Física Atómica, Molecular y Nuclear
Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid



Mapa de fuentes de rayos gamma generado por el telescopio Fermi. La imagen muestra el plano galáctico de la Vía Láctea, así como numerosas fuentes individuales.

NASA/DOE/LAT

Envenenamiento por mordedura de serpiente

La proteómica facilita el desarrollo de tratamientos para el ofidismo, una patología desatendida

Las primeras serpientes ya campaban a sus anchas por nuestro planeta cuando los mamíferos apenas empezaban a esbozarse. Las serpientes evolucionaron a partir de un ancestro común a los lagartos durante el tiempo de los grandes dinosaurios, en el período Cretácico (hace unos 130 millones de años); sin embargo, hasta hace unos 36 millones de años no aparecieron los primeros colúbridos. La radiación de los colúbridos coincide con el advenimiento y diversificación de los roedores, mamíferos esenciales en la dieta de estos reptiles.

En la actualidad, el suborden *Serpentes* de los reptiles escamosos (*Squamata*) agrupa a unas 3000 especies en unos 400 géneros y 18 familias, presentes en hábitats terrestres y acuáticos, desde el mar hasta los desiertos, en todos los continentes, a excepción de la Antártida.

Las serpientes de mayor tamaño y fuerza (pitones, boas y anacondas) utilizan para alimentarse una estrategia mecánica: atrapan a la presa entre sus anillos constrictores impidiéndole la respiración hasta que muere por asfixia. Las serpientes más pequeñas (víboras, serpientes de cascabel, cobras), en cambio, han desarrollado otra arma evolutiva más refinada: el veneno. El veneno de las especies actuales de serpientes ponzoñosas se originó en etapas tempranas de la historia evolutiva de lagartos y serpientes por reclutamiento y transformación, mediante evolución acelerada, de proteínas comunes.

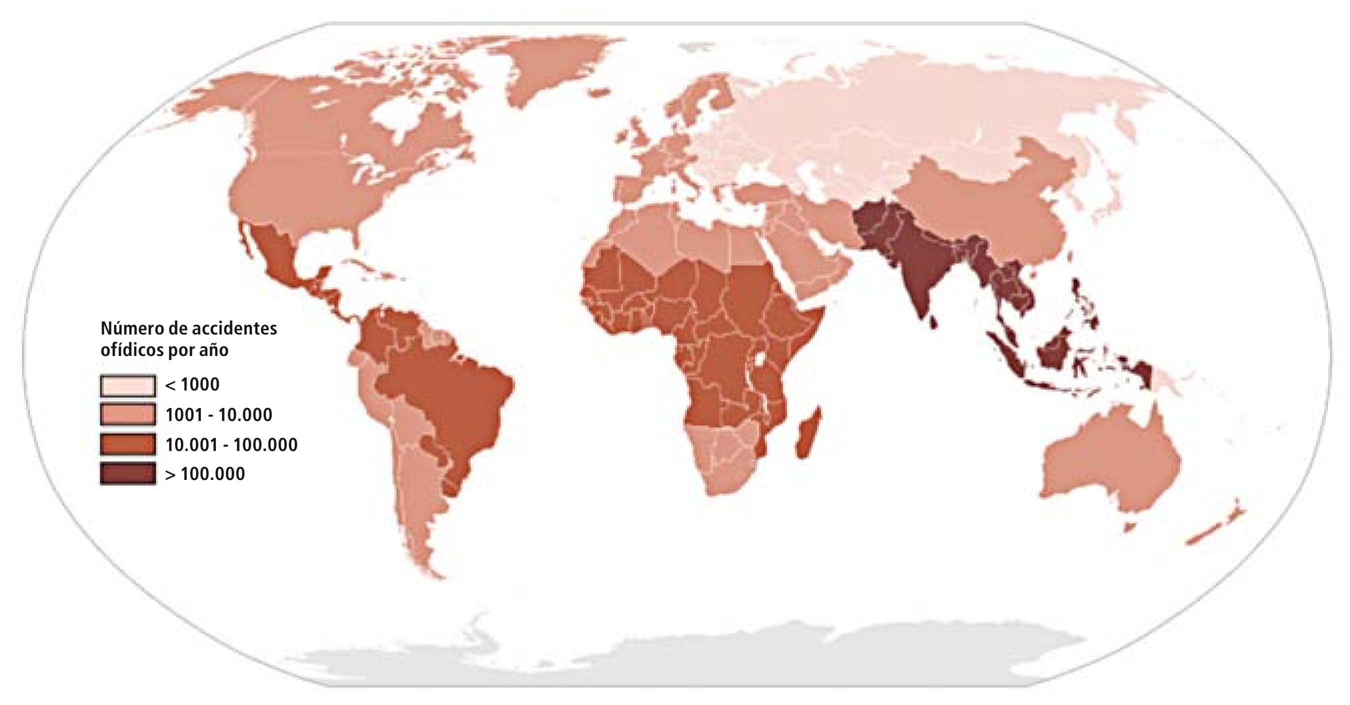
Ofidismo

Los venenos de los vipéridos (subfamilias Viperinae y Crotalinae) poseen un arsenal de proteínas con capacidad de degradar la matriz extracelular y obstruir la cascada de coagulación, el sistema hemostático y la reparación tisular. Las manifestaciones clínicas del envenenamiento por vipéridos y crotálidos pueden ser locales o sistémicas. Los efectos locales se presentan minutos después de la inyección del veneno: incluyen dolor, edema, equimosis y hemorragia local; en numerosos casos cursan con necrosis del área que rodea la mordedura. Entre los efectos sistémicos se observan alteraciones en la coagulación sanguínea y episodios hemorrágicos alejados del sitio de inyección del veneno, miotoxicidad, fallo renal agudo e insuficiencia cardiaca, entre otras.

Unas 640 especies de ofidios son venenosas; de éstas, sólo una fracción reducida representa un peligro serio para nuestra especie. La mayoría de los accidentes por mordedura de serpiente ocurren en regiones pobres de países tropicales de Centroamérica y Sudamérica, Africa subsahariana y Asia; afectan sobre todo a trabajadores y niños de zonas rurales. Según la OMS ocurren anualmente 5,4 millones de accidentes ofídicos. De éstos, 2,7 millones producen envenenamiento y dan lugar a más de 125.000 muertes al año y a un número mayor de personas con lesiones permanentes. Estas cifras hospitalarias podrían estar subestimando la realidad, puesto que numerosas víctimas acuden a curanderos locales o fallecen en su casa sin haber pasado por un centro de salud.

Tratamientos: de la inmunología a la proteómica

La única terapia eficaz contra un envenenamiento por mordedura de serpiente es la administración parenteral de un antiveneno. Los sueros antiofídicos se obtienen mediante la inmunización de équidos y camélidos con dosis subletales de veneno completo. La fracción de inmunoglobulinas purificadas constituye el correspondiente antiveneno. La administración de proteínas extrañas puede



1. Incidencia del envenenamiento por mordedura de serpiente.

FIGURA ADAPTADA DE *THE GLOBAL BURDEN OF SNAKEBITE: A LITERATURE ANALYSIS AND MODELING BASED ON REGIONAL ESTIMATES OF ENVENOMING AND DEATHS.* A. KASTURIRATNE ET AL., *PLoS MED.* 5, E218; 2008.









2. Serpientes de interés médico en Norteamérica (*Crotalus atrox*), Centroamérica (*Bothrops asper*) y Sudamérica (*Bothrops atrox* y *Crotalus durissus terrificus*).

producir en el organismo reacciones adversas, incluida la muerte por shock anafiláctico. Por otra parte, la producción de antivenenos tradicionales o de corte biotecnológico resulta cara para los sistemas sanitarios de numerosos países donde el ofidismo constituye un grave problema de salud pública. Al no ser un negocio rentable, algunas empresas farmacéuticas multinacionales han dejado de fabricar antivenenos.

Para tratar de paliar el ofidismo, en nuestro laboratorio de proteinómica estructural hemos desarrollado protocolos basados en técnicas proteómicas que nos permiten determinar la composición proteínica (proteoma) y la abundancia relativa de las familias de toxinas en un veneno ("venómica"). Este conocimiento resulta esencial a la hora de escoger la mezcla idónea de venenos para lograr un antiveneno polivalente del más amplio espectro posible.

La evolución juega a nuestro favor. Nuestros estudios venómicos muestran que, a pesar de la aparente complejidad de los venenos, éstos constan de un número restringido de familias proteicas cuya distribución y abundancia relativa varían ampliamente entre géneros, especies y subespecies.

Los estudios sobre inmunorreactividad cruzada de antivenenos existentes y venenos de serpientes no incluidas en el cóctel de inmunización ("antivenómica") demuestran una gran conservación de determinantes antigénicos (epítopos) intraespecíficos e interespecíficos en todas las familias de toxinas. Ello permite reducir el problema de la generación de un antiveneno de amplio espectro a la formulación de una mezcla de venenos que incluya el complemento de epítopos necesarios para generar anticuerpos que bloqueen la acción tóxica de todas las familias proteicas presentes en el veneno diana.

El veneno constituye una innovación adaptativa. Su composición está modulada por las condiciones ecológicas a través de la selección natural. La adaptación al medio conlleva divergencias (especies taxonómicamente cercanas desarrollan formulaciones venómicas distintas) y convergencias (especies lejanas producen venenos de acción tóxica similar) en la composición del armamento químico de los animales venenosos.

Dado que la filogenia no refleja el grado de similitud composicional de los venenos, la taxonomía no constituye una herramienta fiable para establecer una clasificación molecular o funcional. El fenotipado por combinación de técnicas cromatográficas y espectrométricas está resultando una estrategia adecuada para la identificación y cuantificación de las toxinas mayoritarias en los venenos. Venómica, antivenómica y fenotipado venómico constituyen las herramientas que aporta la proteómica para hacer frente al envenenamiento por mordedura de serpiente, una patología desatendida.

3. Mediante electroforesis, espectrometría de masas y otras técnicas, se ha obtenido la composición del veneno de la serpiente de cascabel diamantada del oeste (*Crotalus atrox*). La mayor parte corresponde a metaloproteasas (SVMP, de "snake venom metalloprotease") y serinoproteasas. Se han hallado también disintegrinas (inhiben la agregación plaquetaria), fosfolipasas A_2 (PLA_2), L-aminoácido oxidasa (LAO), C-lectinas, péptidos vasoactivos y proteínas secretoras ricas en cisteína (CRISP). Este cóctel de toxinas explica los efectos citotóxicos, miotóxicos, hemotóxicos y hemorrágicos que suele causar el envenenamiento por *Crotalus atrox*.

El veneno de *Crotalus atrox*

Las serpientes de cascabel poseen en la punta de la cola unos característicos anillos óseos sonoros, de ahí su otro nombre, crótalos. Pertenecen al género *Crotalus*. Este clado se originó durante el Mioceno, hace unos 20 millones de años, en la Sierra Madre Occidental de la meseta mexicana; su dispersión hacia el norte y el sur ha originado las 34 especies de crótalos que medran en América, desde el sudeste de Canadá al norte de Argentina (el lector hallará un inventario actualizado de serpientes en http://www.reptile-database.org). Sus mordeduras son tremendamente dolorosas; pueden resultar letales para un humano si no se le administra el antídoto adecuado.

La serpiente *Crotalus atrox*, cascabel diamantada del oeste, habita en grandes extensiones de terreno árido, desde Arkansas a California y norte de México. Los animales adultos sobrepasan los 120 centímetros de longitud y los 6,7 kilogramos de peso. *Crotalus atrox* posee un potente veneno: la dosis letal media intramuscular para ratones es de 20 miligramos por kilo. Causa un gran número de muertes humanas al año, lo que la convierte en la serpiente más peligrosa de Estados Unidos.

Mediante técnicas proteómicas, química combinatoria y otros métodos, hemos determinado las toxinas que componen el veneno de *Crotalus atrox*. Los resultados, publicados en 2009 en el *Journal of Proteome Research*, muestran que el arsenal de toxinas de esta especie se reduce a un par de docenas de proteínas: el 70 por ciento corresponde a metaloproteasas dependientes del catión zinc (Zn^{2+}) y endoproteasas del grupo de las serinoproteasas. Estas toxinas degradan la matriz extracelular y afectan al sistema hemostático. Encontramos también inhibidores de la agregación plaquetaria (disintegrinas), miotoxinas (fosfolipasas A_2), L-aminoácido oxidasa, C-lectinas y péptidos vasoactivos. Ello explica en gran medida los efectos citotóxicos, miotóxicos, hemotóxicos y hemorrágicos típicos del envenenamiento por *Crotalus atrox*.

Esta investigación se enmarca en un proyecto más amplio que se propone desentrañar las bases moleculares de la evolución de los venenos del género *Crotalus*. La elucidación de la composición y mecanismos de diversificación adaptativa de estos venenos facilitará la obtención de un suero anticrotálico panamericano que neutralice todos los venenos del género. La producción de antivenenos de amplio espectro ofrece además una estrategia para abaratar costes y optimizar los recursos terapéuticos.

Juan J. Calvete
Laboratorio de Proteinómica Estructural
Instituto de Biomedicina de Valencia

Calidad del aire urbano

No contaminan sólo los motores. También las obras y el desgaste de frenos, neumáticos y firme de rodadura

La Comisión Europea publicó en 2008 la Directiva de Calidad del Aire y Aire Limpio para Europa (2008/50/CE), donde se fijan valores límite (VL) de exposición de la población —predominante en zonas urbanas— para contaminantes atmosféricos. Entre éstos destacan por su dificultad de cumplimiento los VL de dióxido de nitrógeno (NO_2) y de partículas respirables PM_{10} y $PM_{2,5}$ (que indica la masa de material particulado, PM, de diámetro inferior al número, en micrometros, indicado en el subíndice). Sin olvidarse del ozono (O_3) troposférico, con grandes zonas de incumplimiento normativo fuera de las ciudades. La directiva supone un reto político, ambiental, técnico e incluso científico.

Un parque móvil creciente

En la mayoría de los casos, la superación de los valores límite de NO_2 y PM_{10} o $PM_{2,5}$ se producen en áreas próximas al tráfico rodado. El parque automovilístico ha crecido de forma notable en los últimos decenios, sin limitaciones de acceso a las zonas urbanas. "Hay que acondicionar la ciudad para el automóvil",



1. Capa de mezcla altamente contaminada un día de julio a las siete de la mañana en Barcelona.

proclamaba en los años setenta un político europeo. Ese crecimiento ha dado lugar a que la mayor parte de las grandes ciudades europeas sufran problemas de congestión de tráfico.

En paralelo, la industria automovilística ha realizado un esfuerzo notable en la fabricación de modelos con niveles decrecientes de emisión de contaminantes. Sin embargo, debido al desmesurado incremento del número de vehículos, ese esfuerzo técnico no se ha traducido en una mejora evidente de la calidad del aire.

En algunas ciudades del sur de Europa, el problema de la contaminación se agrava debido al clima (caracterizado por temperaturas e insolación elevadas, y baja renovación de las masas de aire), a la arquitectura urbana (densidad elevada de edificios altos, avenidas, calles estrechas y pocas zonas verdes), que dificultan la dispersión de contaminantes, y a la desmesurada "dieselización" del parque móvil, que resulta en un incremento de las emisiones de partículas.

En España, entre el 40 y 60 por ciento de las estaciones de control de calidad del aire urbano de tráfico superan el VL anual de NO_2 de la directiva fijados para 2010. En cambio, menos del 10 por ciento de las estaciones de control industrial lo superan. Además de problemas locales y directos de calidad del aire, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) por tubos de escape, cuando se liberan junto a las emisiones de hidrocarburos volátiles (HCV), pueden dar problemas de ozono troposférico en zonas circundantes. Ello se debe a que el ozono se genera durante el transporte de masas de aire contaminadas por NO_x e HCV.

Las emisiones de PM son originadas en parte por la quema de combustibles en los motores, siendo las de un motor diésel muy superiores a las de uno de gasolina (también para NO_2). Además, por oxidación de NO_2 se forma ácido nítrico, precursor del nitrato amónico, componente mayoritario de las partículas respirables.

Abrasión contaminante

Además de las emisiones del motor, el desgaste de los frenos, los neumáticos y el firme de rodadura emiten también PM con metales y metaloides (Fe, Cu, Zn, Mn, Ba, Mo, Sn y Sb). Muchos de esos elementos constituían en el pasado los típicos trazadores de emisiones industriales; desde hace unos decenios, lo son del tráfico rodado. Amén de las emisiones debidas al desgaste, existen otras causadas por la resuspensión del material depositado en el firme.

Ese material, que procede de dos tipos de fuentes —naturales y antrópicas (desgaste de componentes del vehículo y del firme, obras, polvo africano y zonas no asfaltadas)—, es resuspendido por turbulencias generadas por los vehículos. Al tratarse sobre todo de partículas gruesas (de entre 2,5 y 10 micras de diámetro) y de origen mineral, las emisiones tienen un altísimo impacto en la concentración de PM_{10}. Sin embargo, hasta la fecha la atención se ha polarizado en la reducción de las emisiones de los motores de los vehículos.

Soluciones

El cumplimiento de los futuros retos de la directiva de calidad del aire va a exigir un esfuerzo técnico adicional para reducir emisiones de contaminantes de los vehículos: proliferación de vehículos híbridos, eléctricos, de gas, aplicación de catalizadores a motores diésel y de gas para reducir emisiones de NO_x y filtros de partículas en motores diésel, entre otras medidas. Sin embargo, ese esfuerzo no basta para cumplir los VL normativos. Ciudades con un demostrado interés por el medio ambiente, como Londres, París y Estocolmo, aplican desde 2003 las medidas mencionadas al transporte público y a los vehículos de la administración. Su valiosa experiencia demuestra que ello no es suficiente.

Para no rebasar los límites de contaminación del aire urbano debe reducirse entre un 30 y un 40 por ciento el tráfico urbano. Ideal que puede alcanzarse mediante varias medidas no técnicas: zonas de parking verde disuasorias, limitación de entrada a los vehículos más contaminantes y acceso favorecido a los más ecológicos. Para ello, la red de transporte público (preferiblemente poco contaminante) debe poder absorber los viajeros que aparquen su vehículo.

Los estudios sobre el efecto de dichas medidas en la calidad del aire urbano son escasos. Sin embargo, los retos de la directiva exigen la toma urgente de decisiones. Para disminuir el riesgo de fracaso, conviene que las decisiones de política ambiental se basen en estudios científicos que avalen su eficacia.

Xavier Querol, Fulvio Amato y **Andrés Alastuey**
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, Barcelona



2. Entre un 15 y un 25 por ciento de las partículas en suspensión atribuibles al tráfico provienen del desgaste de los componentes del vehículo y del firme de rodadura.

Estomas y canales de aniones

El gen SLAC1 *codifica una proteína de membrana responsable del cierre estomático*

Los estomas son poros delimitados por dos células oclusivas, que se sitúan en la superficie de las hojas de todas las plantas terrestres. Los poros se cierran para evitar la pérdida de agua, o transpiración, y se abren para captar el dióxido de carbono (CO_2) que será fijado por la planta durante la fotosíntesis.

La apertura y cierre del estoma dependen del intercambio de iones entre las células oclusivas y las células epidérmicas adyacentes. El flujo de los aniones malato y cloruro (Cl^-) desde las células oclusivas hacia las adyacentes origina la despolarización de la membrana, lo que a su vez conlleva la salida del catión potasio K^+, que provoca el cierre estomático. El transporte de K^+ tiene lugar a través de canales situados en la membrana plasmática.

Múltiples estímulos ambientales inducen el cierre del poro estomático. Entre ellos, los altos niveles de CO_2, la oscuridad, la baja humedad del aire y el ozono.

Los grupos encabezados por Jaakko Kangasjärvi, de la Universidad de Helsinki, y Koh Iba, de la Universidad de Kyushu, encontraron que las plantas con mutaciones en el gen *SLOW ANION CHANNEL-ASSOCIATED1* (*SLAC1*) —mutante *slac1*— no cerraban sus estomas en respuesta a las altas concentraciones de CO_2 o de ozono.

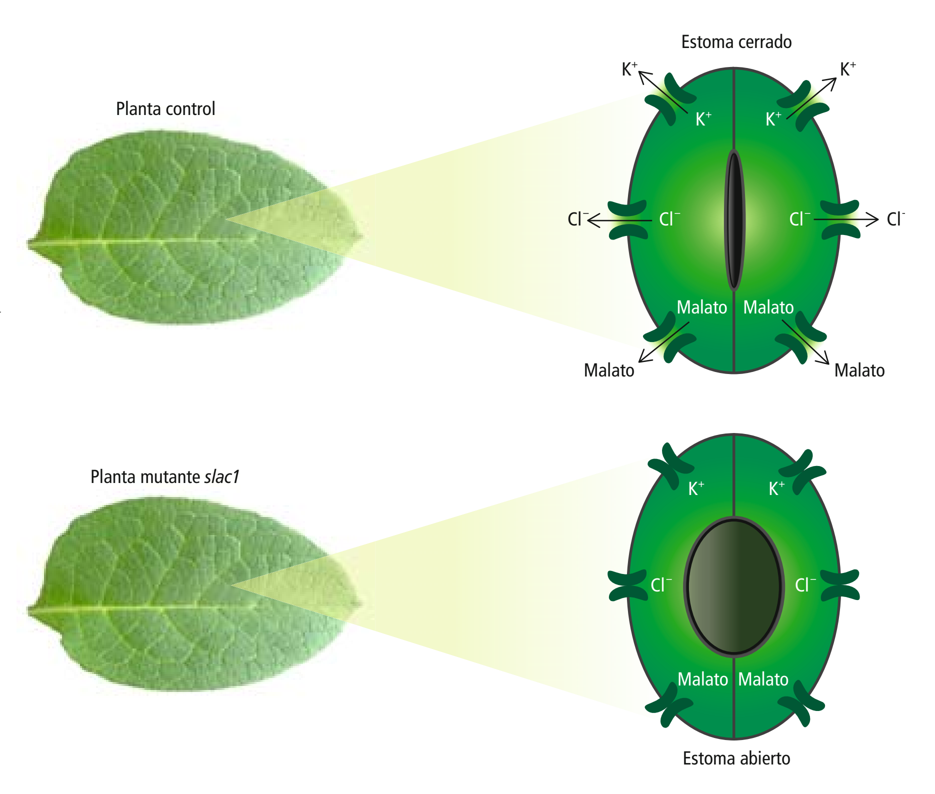
Descubrieron, además, que el mutante cerraba parcialmente sus estomas sólo en condiciones de oscuridad y escasa humedad ambiental. Y presentaba alterada la respuesta al ácido abscísico, una hormona vegetal que induce el cierre estomático.

Ambos grupos de investigadores revelaron que el gen *SLAC1* codificaba una proteína de membrana, de unos quinientos aminoácidos, y se transcribía en células oclusivas y también en el sistema vascular. El grupo de Kangasjärvi introdujo transitoriamente la proteína SLAC1 en células epidérmicas de cebolla y en protoplastos (células desprovistas de su pared) de células oclusivas de tabaco. Observó que SLAC1 se anclaba en la membrana plasmática de las células de esos organismos.

El grupo de Koh Iba aportó nueva información al descubrir la misma proteína en la membrana plasmática de las células oclusivas de *Arabidopsis*. Todos los datos eran compatibles con la presencia en SLAC1 de secuencias de aminoácidos que se sabe interaccionan con la membrana celular.

Pero, ¿qué papel desempeña la proteína SLAC1 en la membrana de las células oclusivas? Si se considera que el flujo de malato y Cl^- desde las células oclusivas desencadena el cierre estomático, SLAC1 podría formar parte, o regular la función, de un canal para el transporte de los aniones. El grupo japonés examinó esta posibilidad midiendo los niveles de iones en protoplastos de células oclusivas del mutante *slac1*. Después, comparó esos datos con los valores de los iones obtenidos en protoplastos de células oclusivas de plantas control sin la mutación. Los investigadores comprobaron que los protoplastos del mutante *slac1* poseían concentraciones de los aniones malato y Cl^- más elevadas que los de las plantas control. En efecto, los resultados sugerían que la proteína SLAC1 formaba parte, o regulaba la función, de un canal de aniones.

Se sabe que el transporte de malato y Cl^- desde las células oclusivas hacia las células epidérmicas adyacentes requiere la activación de canales de flujo lento (tipo "S") y de flujo rápido (tipo "R") de aniones. La activación tiene lugar durante el cierre estomático. El grupo finlandés investigó si esos canales funcionaban en el mutante *slac1*. Halló que lo hacían sólo los de flujo rápido. De lo



Los estomas están formados por dos células oclusivas que delimitan un poro. A través del poro sale agua y entra dióxido de carbono que la planta fija y asimila mediante la fotosíntesis. En plantas control, hay múltiples estímulos que inducen la salida de malato y cloruro (Cl^-) de las células oclusivas provocando el cierre estomático. La salida de estos aniones desencadena la despolarización de la membrana, lo que a su vez, induce la salida de potasio (K^+) a través de unos canales ampliamente caracterizados. El mutante *slac1*, en cambio, es incapaz de cerrar sus poros ante tales estímulos. El gen defectuoso en el mutante impide la codificación de una proteína necesaria para el buen funcionamiento de canales de aniones de flujo lento.

que se deduce que el gen *SLAC1* es necesario para el normal funcionamiento de los canales de flujo lento de aniones. Si se tiene en cuenta que el mutante *slac1* no cierra sus estomas en respuesta a una gran variedad de estímulos, los canales de flujo lento de aniones deben tener un papel principal durante el cierre estomático.

El grupo de Koh Iba avanzó un paso más al adentrarse en la función de tres genes de *Arabidopsis*, los genes *SLAH*, que son homólogos a *SLAC1*. Igual que la proteína SLAC1, las proteínas codificadas por los tres genes *SLAH* se alojan en la membrana plasmática. Sin embargo, a diferencia del gen *SLAC1*, no se expresan en células oclusivas. *SLAH1* y *SLAH2* lo hacen en la raíz; *SLAH3*, en toda la planta menos en las células oclusivas.

Los investigadores diseñaron experimentos que les permitieron expresar los genes *SLAH* en las células oclusivas del mutante *slac1*. Descubrieron que *SLAH1* y *SLAH3* podían contrarrestar los efectos inducidos por la mutación. No ocurrió lo mismo con *SLAH2*. La presencia de una zona muy hidrofóbica en la secuencia de aminoácidos de SLAH2, que quizás interaccione con la membrana, podría explicar la divergencia funcional entre esta proteína y las otras dos homólogas a SLAC1.

Así pues, ambos grupos de investigadores han identificado la primera pieza necesaria para la función de un canal de flujo lento de aniones que, además, participa en el cierre estomático en respuesta a una amplia variedad de estímulos. La capacidad de los genes *SLAH* para complementar el fenotipo del mutante *slac1* indica que estos canales de aniones no son exclusivos de los estomas, sino que deben estar presentes también en otros tipos celulares.

El gen *SLAC1* nos ofrece, pues, una oportunidad única para ahondar no sólo en el conocimiento del movimiento estomático, sino también en el transporte de aniones en general. Debido a que el cierre del poro estomático evita la pérdida de agua, los resultados presentados proporcionan una valiosa herramienta para diseñar y producir plantas mejor adaptadas a la escasez hídrica.

Laura Serna
Facultad de Ciencias del Medio Ambiente
Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo

Predecir el éxito de las especies invasoras

El mayor reto de la biología de invasiones

Cuando en 1975 se observó la primera pareja de cotorras argentinas *Myiopsitta monachus* —una especie originaria de América del Sur— viviendo en libertad en un parque de Barcelona, nadie podía imaginarse lo que iba a suceder. En menos de 25 años, la población se multiplicó de forma exponencial. En 2001 contaba ya con más de 1400 individuos.

Hoy en día la cotorra argentina, una de las aves más abundantes de la ciudad y alrededores, empieza a incidir de forma preocupante sobre la producción de frutas y hortalizas, además de provocar molestias a los ciudadanos y perjudicar seriamente a los árboles de parques y jardines.

Casos como el de la cotorra argentina en Barcelona plantean una cuestión controvertida entre los científicos: ¿Se puede prever con cierta exactitud si una especie exótica llegará a establecerse en un nuevo lugar? Poder predecir el éxito de las invasiones representaría una herramienta básica para hacer frente al impacto ecológico, económico y sanitario de las especies invasoras, ya que las estrategias de erradicación y control han resultado ser muy costosas y poco eficaces.

Si lográramos conocer el riesgo real de que una especie se establezca y genere problemas en el lugar de introducción, podríamos entonces abordar con solvencia políticas de importación y venta de especies exóticas, idear sistemas de detección y erradicación precoz de especies particularmente problemáticas e informar a la opinión pública sobre los problemas que ocasiona poseer y liberar ciertas especies exóticas.

No obstante, durante mucho tiempo los ecólogos han manifestado muchas dudas sobre la posibilidad de predecir el resultado de las introducciones de especies, ya que el azar se considera un factor determinante en el proceso de invasión. Por ejemplo, se sabe que, si se introducen 1000 individuos de una es-



La cotorra argentina *Myiopsitta monachus* es un ave invasora de origen sudamericano que se ha asentado con éxito, principalmente en los grandes núcleos urbanos del litoral mediterráneo español.

pecie en una región fuera de su área de distribución natural, su probabilidad de éxito triplicaría de lejos la probabilidad de éxito al introducir sólo 10 individuos. Las poblaciones fundadoras pequeñas corren un alto riesgo de extinguirse porque son muy vulnerables a las fluctuaciones estocásticas de tipo demográfico, genético o ambiental.

Y no sólo importa el número de individuos. El éxito depende también de factores aleatorios como el sexo, la edad, la condición física y la variación genética de los individuos introducidos.

La posibilidad de que la biología de invasiones se convirtiera en una ciencia predictiva fue puesta en entredicho por el ecólogo Paul Ehrlich en un artículo publicado en 1989, donde señalaba que aunque los ecólogos "...pueden hacer predicciones generales sobre las invasiones", todavía "...no se hallan capacitados para predecir con precisión el resultado de una sola invasión o introducción".

Sin embargo, en los últimos veinte años se ha experimentado un enorme progreso en la comprensión del proceso de invasión. El descubrimiento más importante ha sido la constatación de que, si bien el azar desempeña una función muy importante en las invasiones, el éxito depende también de ciertos atributos de las especies. La pregunta que nos planteamos es si podemos utilizar esa información para predecir el resultado de la introducción de nuevas especies. En un estudio reciente hemos abordado la cuestión centrándonos en las aves, uno de los grupos que más sufre ese proceso.

Se trataba de estimar el riesgo de invasión modelando la probabilidad de establecimiento de las especies en función de los atributos de las mismas. Para construir los modelos se utilizó información histórica de introducciones deliberadas o accidentales de aves en distintas regiones del planeta, concretamente en Europa, Norteamérica y Oceanía. De las 832 introducciones de especies analizadas, 311 tuvieron como consecuencia el establecimiento de poblaciones permanentes en la nueva región. Según habían avanzado ya estudios precedentes, el factor que mejor predecía el éxito o el fracaso de las introducciones resultó ser el número de individuos liberados.

Además del tamaño de la población fundadora, los atributos de las especies emergieron como factores importantes en el resultado de las introducciones de aves. Los atributos más relevantes fueron el generalismo ecológico y el tamaño del cerebro, que se relaciona con la flexibilidad de comportamiento. Es fácil imaginar que una especie que utiliza una amplia diversidad de hábitats y se muestra capaz de ajustar su comportamiento a nuevas condiciones ambientales tiene más probabilidades de encontrar nuevos recursos y evitar depredadores en la región de introducción que otra especie que mantenga el mismo comportamiento que en su región de origen.

Para comprobar hasta qué punto el número de individuos liberados, el tamaño del cerebro y el generalismo ecológico permitían predecir el resultado de las introducciones de aves, se utilizó información de invasiones en Europa y Australia que no se había aprovechado para la construcción de nuestros modelos. La sorpresa fue que los modelos podían predecir el éxito o fracaso de dichas introducciones con gran exactitud (cerca del 87 %), a pesar de utilizar sólo las tres variables descritas con anterioridad.

Además, los modelos consiguieron predecir el resultado de las introducciones con mayor precisión y necesitaron menos información que los protocolos alternativos de evaluación de riesgos, basados en largos cuestionarios que clasificaban las especies en distintos grupos de riesgo según la puntuación que obtenían en las preguntas.

Si bien es imposible prever con exactitud las consecuencias de la introducción de una nueva especie, nuestros análisis indican que sí se pueden identificar situaciones en que el riesgo de establecimiento de la especie será elevado; la precisión del método permite defender su utilidad. Unicamente a través de la ejecución de protocolos de evaluación de riesgos en futuras políticas de protección ambiental se podrá mitigar el impacto de las especies de aves invasoras y contribuir a la preservación de la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas.

Miquel Vall-llosera
Daniel Sol
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, Universidad Autónoma de Barcelona
Centro de Estudios Avanzados de Blanes, CSIC

8 maravillas del sistema solar

Acompañamos al artista Ron Miller en un viaje por ocho de los panoramas más sobrecogedores del sistema solar. ¿Qué veríamos y, sobre todo, qué sentiríamos si pudiésemos trasladarnos a esos parajes remotos? El trabajo del artista —basado en la interpretación de los datos de sondas espaciales como Cassini, que explora el sistema de Saturno, o MESSENGER, que ha sobrevolado Mercurio tres veces y entrará en órbita permanente en torno al planeta en marzo de 2011— nos permite hacer una primera visita a estos lugares inolvidables

Edward Bell

ILUSTRACIONES DE RON MILLER



1

LOS ANILLOS DE SATURNO

ESTAMOS CRUZANDO la troposfera de Saturno, bajo la estructura de anillos más impresionante de todo el sistema solar. Es difícil imaginar un paisaje más espectacular. Los anillos blancos de hielo se elevan unos 75.000 kilómetros sobre nuestra cabeza y su brillo ilumina todo a nuestro alrededor. No menos de seis medias lunas aparecen en el cielo. La luz del crepúsculo se dispersa a través de la bruma de cristales de amoniaco, formando un parhelio (imagen ficticia del Sol). Las nubes de amoniaco cruzan la atmósfera a velocidades superiores a los 1500 kilómetros por hora, arrastradas por algunos de los vientos más rápidos del sistema solar. Unos 30.000 kilómetros por debajo, con presiones que ningún artefacto humano podría soportar, se extiende un océano de hidrógeno metálico líquido. No aterrizaremos en este planeta.



2

LA MANCHA ROJA DE JUPITER

EL VIAJERO difícilmente puede hacerse una idea de la escala del mayor anticiclón del sistema solar. Desde este punto, apenas podemos apreciar una pequeña parte de la Gran Mancha Roja, la cual se eleva unos 8 kilómetros sobre las nubes que la rodean. Relámpagos que podrían reducir a cenizas cualquier ciudad estallan en la base y se proyectan hacia las nubes más bajas. Los vientos que envuelven al anticiclón se arremolinan a más de 400 kilómetros por hora. La mancha completa una rotación una vez cada siete días. La turbulencia generada por esta colosal tormenta es brutal, y su sonido, ensordecedor. Dos planetas del tamaño de la Tierra podrían caber dentro de esta tempestad, activa en el hemisferio sur de Júpiter desde hace unos 400 años. No existen pruebas de que vaya a amainar.





3

LOS VALLES MARINERIS, MARTE

HAY GENTE QUE SE ARRODILLA y llora ante el espectáculo que ofrece el Gran Cañón de Arizona. Podemos preguntarnos cómo reaccionaría el primer viajero que llegara al valle Mariner y presenciase este cañón. Con casi 6 kilómetros y medio de profundidad, es tan ancho que en algunos lugares hay que forzar la vista para vislumbrar el otro extremo. Esta gigantesca fractura tectónica se extendería desde Nueva York a California —la cuarta parte del planeta—, por lo que la salida del Sol en uno de los lados tiene lugar unas seis horas antes que en el extremo opuesto. Hubo una vez en que el agua corrió por los surcos de esta llanura. En esta imagen, el viajero aprecia la neblina helada que inunda el valle mientras el Sol se pone sobre el borde norte.

4

LOS GEISERES DE ENCELADO

SE SIENTEN ANTES DE VERLOS: aquí no se propaga el sonido, pero un sepulcral ruido sordo recorre nuestro interior desde los pies hasta el pecho. Después llega una erupción: dos gigantescas lenguas de hielo explotan en la superficie de Encélado y escupen cristales helados hacia el espacio a más de 1600 kilómetros por hora. Un Sol distante ilumina toda esta violencia silenciosa. Con apenas una dieciseisava parte de la gravedad de nuestra Luna, Encélado, el sexto mayor satélite de Saturno, no es un mundo fácil de pisar. Los excursionistas necesitarían agarrarse a sus mochilas propulsoras y ser cautos para evitar los valles en los que nacen los descomunales géiseres.





5

LOS GEISERES DE TRITON

LOS VISITANTES de la mayor luna de Neptuno, Tritón, serían recibidos por una formación de géiseres criogénicos compuestos probablemente de escarcha de nitrógeno y otras sustancias orgánicas de color oscuro. De aspecto humeante, estos géiseres podrían oírse desde distancias kilométricas. Se elevan a más de 8000 metros por la fina atmósfera, altura a la que son dispersados por los vientos. El metano y el nitrógeno helados cubren la superficie de este mundo, cuya temperatura cae hasta los 200 grados bajo cero.

6

PICOS DE LUZ ETERNA

NO TAN LEJOS DE CASA, en nuestra propia Luna, se da una condición única (*abajo*): los "picos de la luz eterna". Descubiertos en 1994 sobre el cráter Peary, cerca del polo norte, son las únicas regiones del sistema solar en las que nunca se pone el Sol. (Otras zonas similares podrían existir en Mercurio, si bien aún no se han observado.) Esta situación atípica obedece a que el eje de rotación de la Luna se encuentra ligeramente inclinado con respecto al plano que forman su órbita y la de la Tierra alrededor del Sol. Este lugar, una incuestionable atracción turística, podría dar cobijo algún día a la primera base lunar. Las temperaturas locales fluctúan poco, quizás unos 20 grados, lo que lo convierte en un lugar ideal para establecerse. La posibilidad de que exista agua helada constituye otra ventaja añadida.

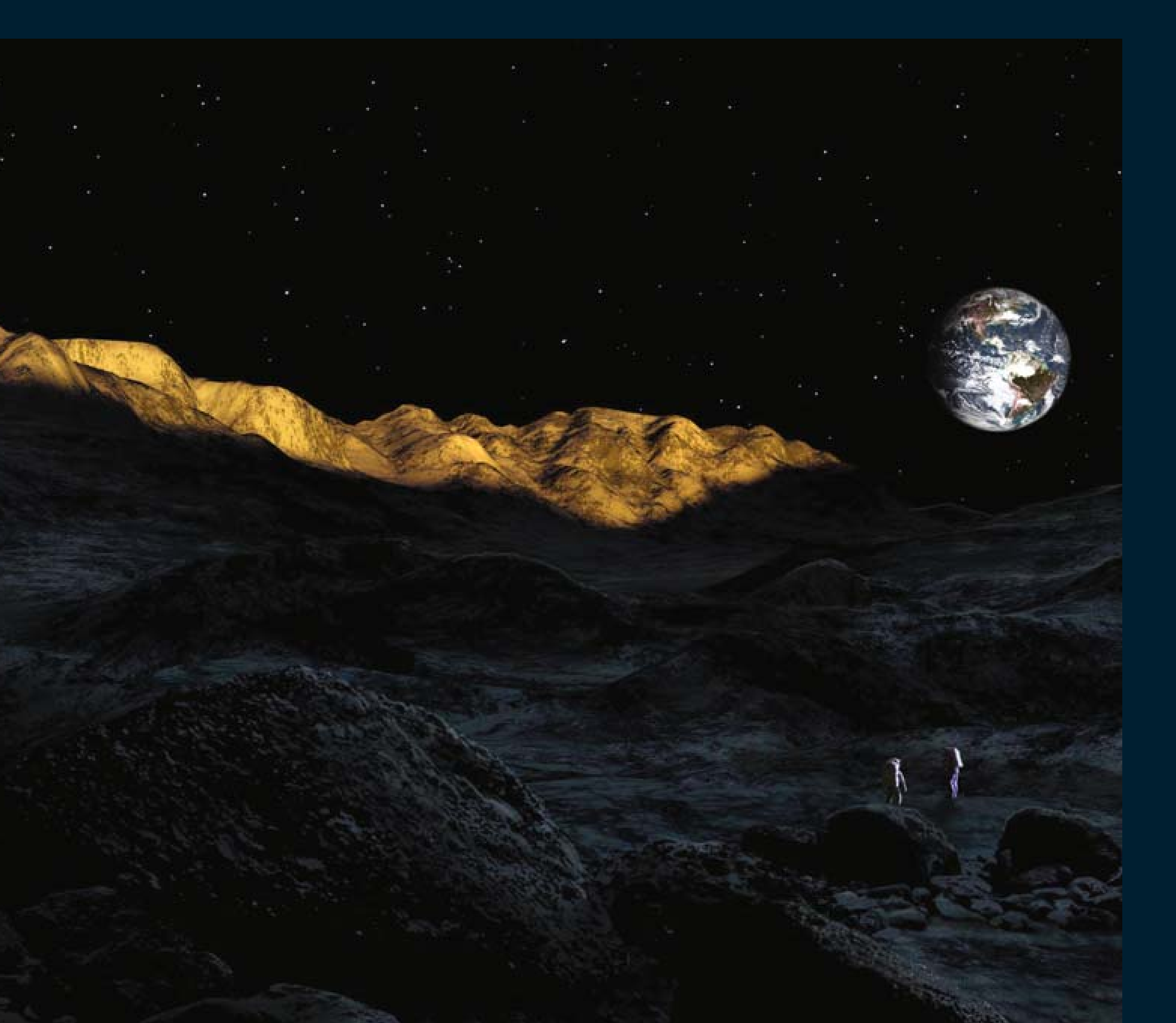
7

EL CRATER HERSCHEL DE MIMAS

Mimas

LOS ESCALADORES que ascendiesen al pico central del cráter Herschel, en la luna Mimas de Saturno (*izquierda*), se encontrarían a más de 6000 metros por encima de la superficie. Rodeados por las paredes del cráter, de unos 5000 metros de altura, y con Saturno al fondo (*derecha*), los viajeros se preguntarían cómo es posible que Mimas sobreviviera al impacto que formó esta depresión de 139 kilómetros de ancho, casi un tercio del diámetro del satélite.

NASA



8 AMANECER EN MERCURIO

LOS ATARDECERES Y LOS AMANECERES en Mercurio son espectáculos dignos de contemplación. Con un tamaño aparente dos veces y medio mayor que en la Tierra, el Sol parece salir y ponerse dos veces en un día mercuriano: primero aparece en el horizonte para dibujar un arco a través del cielo, detenerse y retroceder hacia el lugar del amanecer; allí se para de nuevo y, finalmente, emprende su viaje hacia el horizonte del atardecer. Estas curiosas maniobras aéreas se deben a que Mercurio rota sobre su eje tres veces por cada dos órbitas que completa alrededor del Sol y a la excentricidad de dichas órbitas.



EL ILUSTRADOR

Ron Miller es autor e ilustrador de más de 40 libros, entre los que se incluyen *Viaje extraordinario* (Planeta, 1983) y *Cycles of fire*, escritos junto al científico planetario y artista William K. Hartmann. En agosto de 1997 publicaba en INVESTIGACION Y CIENCIA "Julio Verne, un visionario mal comprendido", en colaboración con A. B. Evans. Ha sido ganador del Premio Hugo de ciencia ficción y del Premio Rudaux Memorial de la Asociación Internacional de Artistas Astronómicos.

EL AUTOR

Edward Bell es director de arte de *Scientific American*.

¿Quiere saber más?

VIAJE VIRTUAL EN CASSINI. El Explorador Interactivo Cassini en Saturno (CASSIE) permite visualizar en tres dimensiones el viaje de la sonda Cassini alrededor de Saturno y de sus lunas. La sonda puede ser localizada en cualquier punto de su misión. **http://saturn.jpl.nasa.gov/video/cassinivirtualtour/**

ARTICULO MULTIMEDIA EN SCIENTIFIC AMERICAN. www.scientificamerican.com/article.cfm?id=8-wonders

CIRCUITOS DEFECTUOSOS

La neurociencia está revelando las conexiones neurales defectuosas que dan lugar a los trastornos psicológicos. Los psiquiatras deberán reconsiderar las causas de las enfermedades mentales

Thomas R. Insel

CONCEPTOS BASICOS

- Debido a que muchos trastornos mentales no conllevan daños cerebrales evidentes, se ha pensado durante largo tiempo que los mismos obedecían a procesos puramente psicológicos.
- La obtención de imágenes del cerebro pone de manifiesto que la actividad anómala en determinados circuitos neurales que rigen los procesos mentales se encuentra en el origen de multitud de enfermedades mentales. Por primera vez, se hacen visibles las disfunciones fisiológicas que provocan los síntomas mentales.
- Comprender la biología de las enfermedades mentales aclarará el origen del funcionamiento anómalo de un circuito, proporcionará métodos objetivos para el diagnóstico y dará lugar a tratamientos personalizados.

Históricamente, en la mayoría de las áreas de la medicina, los médicos han tratado de averiguar las causas que originan la enfermedad antes de diseñar un tratamiento. En el pasado, sin embargo, y ante la imposibilidad de detectar la causa física de los trastornos mentales o conductuales, se asumía que el problema era exclusivamente "mental" y se aplicaba una terapia psicológica. Mas hoy en día, los planteamientos basados en la biología moderna, la neurociencia y la genómica están sustituyendo a casi un siglo de teorías puramente psicológicas, dando lugar a nuevas estrategias para combatir las enfermedades mentales.

En la actualidad se admite que muchas enfermedades antiguamente clasificadas como "mentales" cuentan en realidad con una causa biológica: en el autismo, por ejemplo, el origen obedece a una anomalía en las conexiones neuronales que, con frecuencia, es atribuible a mutaciones genéticas; la esquizofrenia se considera y se trata hoy en día como un trastorno del desarrollo del cerebro. Sin embargo, la gente e incluso gran número de facultativos se han mostrado reacios a la hora de aceptar que determinadas enfermedades como la depresión, el trastorno obsesivo-compulsivo (TOC) o el trastorno por estrés postraumático (TEPT) también podrían ser trastornos fisiológicos del cerebro.

Una de las razones fundamentales que explican el pobre entendimiento sobre dichas enfermedades mentales es que, a diferencia de otros trastornos neurológicos clásicos del tipo de la enfermedad de Parkinson o la apoplejía, en las que los daños son visibles, los trastornos mentales no se caracterizan por la existencia de lesiones manifiestas en el cerebro. Hoy en día, sin embargo, contamos con técnicas que visualizan el funcionamiento del cerebro vivo. Esas técnicas permiten detectar problemas relacionados con los niveles de actividad o con la comunicación entre regiones cerebrales, aun en ausencia de una pérdida manifiesta de células.

La obtención de imágenes neurales ha abierto la caja negra que hasta ahora era el cerebro. Las enfermedades mentales pueden, por vez primera, ser estudiadas como anomalías en las conexiones entre diferentes regiones del cerebro (o, a veces, como fallos de coordinación entre las mismas). Las regiones cerebrales que, en condiciones normales, cooperan para desempeñar tareas mentales pueden considerarse análogas a circuitos eléctricos. Las investigaciones más recientes demuestran que la causa subyacente a numerosos trastornos mentales es, de hecho, el funcionamiento anómalo de circuitos enteros.

Aún no se conocen completamente todos los detalles sobre el "diagrama de circuitos" o "mapa" de cada enfermedad concreta. Pero este nuevo punto de vista ya está originando cambios de calado en la psiquiatría, abriendo nuevas vías para un diagnóstico más empírico de las enfermedades mentales y ayudando a entender las causas que las provocan. Algo que, sin duda, resulta prometedor a la hora de elaborar tratamientos más eficaces.

DWIGHT ESCHLIMAN



Bloqueo por sobrecarga

La depresión nos ofrece el que quizá sea el mejor ejemplo del rápido progreso en nuestra comprensión de las bases biológicas de las enfermedades mentales. El trastorno depresivo mayor, o depresión clínica, afecta al 16 por ciento de la población de EE.UU. Sus consecuencias pueden llegar al desempleo, al consumo abusivo de drogas o al suicidio. Se trata también de una de las enfermedades con mayor prevalencia en el mundo desarrollado, donde constituye la causa principal de baja médica entre las personas con edades de entre 15 y 44 años.

Además de una profunda sensación de desesperación, impotencia y desmoralización, sus síntomas incluyen toda una serie de manifestaciones de orden físico: pérdida de apetito, trastornos del sueño, estreñimiento y fatiga, entre otros. Se sabe que la depresión afecta al sistema inmunitario y a multitud de sistemas hormonales, al tiempo que incrementa el riesgo de enfermedades cardiovasculares. No obstante, y a pesar de sus efectos generalizados sobre el organismo, la depresión es fundamentalmente un trastorno cerebral. De hecho, numerosos indicios apuntan a una diminuta región de la corteza prefrontal (CPF), el "área 25", como uno de los puntos focales del circuito de la depresión.

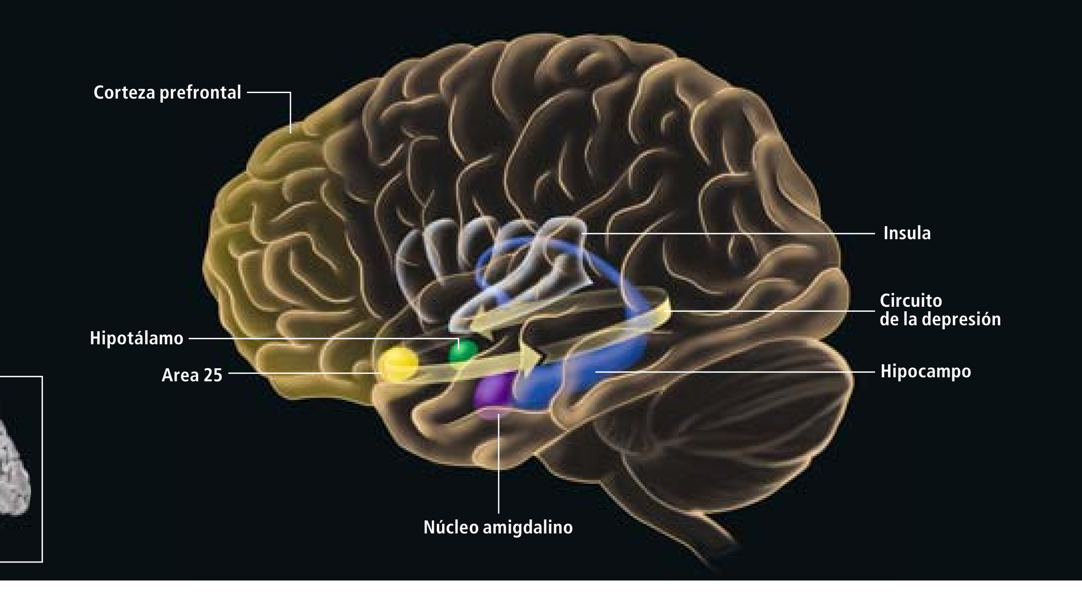
El término "área 25" se debe al neurólogo alemán Korbinian Brodmann, quien, en su atlas clásico del cerebro humano de 1909, asignó números a determinadas regiones de la corteza cerebral. Durante los últimos 100 años, esta región (en la zona frontal del cerebro y de difícil acceso) ha suscitado poco interés. Sin embargo, en el transcurso del último decenio, el descubrimiento del papel crucial que el área 25 desempeña en la depresión la ha convertido en una región de gran interés neurológico. Helen Mayberg y sus colaboradores, de la Universidad Emory (Atlanta), han demostrado que, en pacientes con depresión, el área 25 manifiesta una actividad inusitada. Asimismo, el alivio de los síntomas registrado tras prácticamente cualquier tipo de tratamiento (desde la medicación hasta la psicoterapia) se acompaña de un descenso de la actividad en esta zona.

Existen otros indicios que reflejan la importancia del área 25 en la depresión. Esta región es extraordinariamente rica en transportadores de serotonina, las proteínas que regulan la

LA DEPRESION Y EL GOBERNADOR DEL ESTADO DE ANIMO



Quienes padecen depresión se encuentran desanimados y sin fuerzas. Sus tiempos de reacción y su capacidad para recordar se ven inhibidos, como si algo aplacase los niveles normales de actividad cerebral. Sin embargo, síntomas habituales como la ansiedad y las alteraciones del sueño parecen indicar la hiperactividad de determinadas regiones cerebrales. Las imágenes de las regiones más afectadas indican que el origen de estos desequilibrios se encuentra en una diminuta estructura del cerebro denominada "área 25", que actúa como la centralita del circuito cerebral asociado a la depresión. El área 25 está conectada directamente al núcleo amigdalino (responsable del miedo y la ansiedad) y al hipotálamo (asociado a las respuestas ante el estrés). A su vez, esas regiones intercambian señales con el hipocampo (un centro de procesamiento de la memoria) y la ínsula (donde se procesan las percepciones sensoriales y las emociones). Se sospecha que, en las personas portadoras de una variante génica que inhibe el procesamiento de la serotonina, un área 25 menor de lo normal (*en rojo en el inserto inferior*) aumenta el riesgo de padecer depresión.



SAMI SARKIS *Getty Images* (*fotografía*); DE "5-HTTLPR POLYMORPHISM IMPACTS HUMAN CINGULATE-AMYGDALA INTERACTIONS: A GENETIC SUSCEPTIBILITY MECHANISM FOR DEPRESSION," POR LUKAS PEZAWAS ET AL., EN *NATURE NEUROSCIENCE*, VOL. 8; 8 DE MAYO DE 2005 (*imagen del cerebro*); PRECISION GRAPHICS (*ilustración*)

cantidad de serotonina (un neurotransmisor) de la que pueden disponer las neuronas. (Se cree que muchos antidepresivos actúan sobre estos transportadores, con lo que intensifican la señalización neuronal mediada por la serotonina.) En sus investigaciones realizadas en el Instituto Nacional de Salud Mental de EE.UU., Lukas Pezawas, Andreas Meyer-Lindenberg y sus colaboradores estudiaron las imágenes cerebrales de más de 100 individuos sanos. Después, compararon las de los sujetos que presentaban, respectivamente, las variantes "corta" y "larga" del gen que codifica el transportador de serotonina.

Descubrieron una única diferencia entre los cerebros de los sujetos: los que presentaban la variante génica corta (la cual da lugar a una menor producción de la proteína transportadora y se cree que confiere un mayor riesgo de padecer depresión) exhibían un menor volumen de tejido cerebral en el área 25. Además, en dichos individuos la actividad del área 25 se encontraba funcionalmente desacoplada de otras regiones subcorticales del cerebro, como el núcleo amigdalino.

Hoy en día, como resultado de ese y otros estudios, los neurólogos consideran que la depresión consiste en un trastorno relacionado con una actividad anómala del área 25; una actividad que, a la postre, perturba una vasta red de conexiones. Esta red incluye el hipotálamo y el tronco encefálico (que provocan cambios en el apetito, sueño y vigor), el núcleo amigdalino y la ínsula (relacionados con la ansiedad y el estado de ánimo), el hipocampo (fundamental en los procesos de atención y memoria) y regiones de la corteza frontal (que intervienen en la capacidad de comprensión y en la autoestima).

Después de todo, el cerebro es un órgano que procesa información. Integra constantemente los datos provenientes de los sentidos y coordina las respuestas. Volviendo a emplear la analogía con los circuitos eléctricos, se cree que el área 25 controla la mencionada red cerebral mediante la detección y modulación de los niveles de actividad de ciertas regiones que controlan el miedo, la memoria y la autoestima. Así, un área 25 defectuosa dejaría de coordinar todas esas actividades, provocando con ello un procesamiento sesgado de la información y evaluaciones distorsionadas acerca del mundo exterior y en la propia introspección del individuo.

Si esa noción es correcta, el restablecimiento de la señalización normal en el área 25 debería

moderar la actividad de los centros cerebrales mencionados y disminuir así los síntomas de la depresión. De hecho, Mayberg ha demostrado que la estimulación eléctrica directa en zonas próximas al área 25 reduce la actividad de este nodo y conduce a la recuperación en pacientes que no respondieron a las terapias habituales.

Si el área 25 hace que el cerebro, al igual que un ordenador, quede bloqueado en un bucle de actividad anormal, el objetivo de una terapia podría consistir en algo parecido a reiniciar un ordenador que se ha quedado bloqueado.

Ese mismo principio puede aplicarse a otros trastornos mentales, en particular al trastorno obsesivo-compulsivo, que se manifiesta claramente como un ciclo de pensamientos y comportamientos anómalos.

Repeticiones incesantes

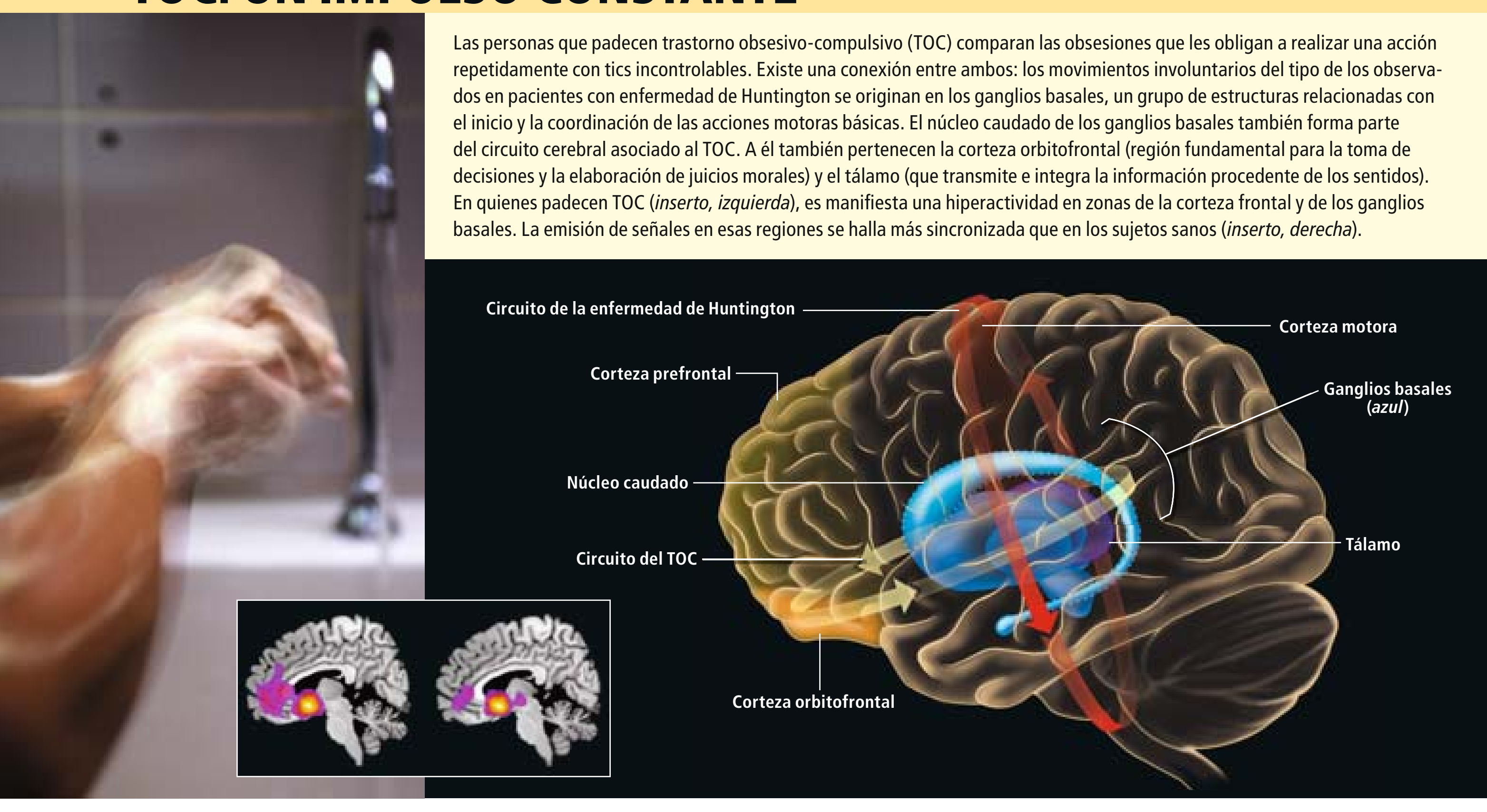
En el pasado, el TOC se consideraba el prototipo de la neurosis, provocado por un conflicto psíquico e idóneo para ser tratado mediante el psicoanálisis. Las personas con TOC experimentan pensamientos (obsesiones) molestos y recurrentes, y su vida cotidiana puede verse afectada ante la necesidad de llevar a cabo rituales (compulsiones) típicos y repetitivos. Por ejemplo, algunas personas se sienten contaminadas y pueden lavarse repetidamente hasta el punto de provocarse abrasiones. Otros experimentan de forma persistente la sensación de haber incumplido con alguna responsabilidad, por lo que comprueban una y otra vez la cocina o los grifos antes de salir de casa. A pesar de que, por regla general, quienes padecen esta enfermedad reconocen que sus pensamientos carecen de fundamento, no logran controlar ni sus obsesiones ni sus compulsiones. En algunos casos graves, el trastorno puede desembocar en una discapacidad.

Los sujetos que padecen TOC describen a menudo sus síntomas como “tics mentales”. De hecho, muchos pacientes presentan, además de pensamientos obsesivos, verdaderos tics. La mayoría de los neurólogos cree que en la regulación del movimiento intervienen una serie de bucles que conectan la corteza cerebral con zonas como los ganglios basales, que constituyen los centros donde se inician y se coordinan diversos aspectos motrices. Los movimientos involuntarios que se observan en los tics motores (o, de forma más sobrecogedora, en la enfermedad de Huntington) reflejan una actividad anómala en este circuito motor, que suele iniciarse en los ganglios basales.

Las neuroimágenes de sujetos con TOC muestran una actividad anormal en un bucle

KEITH BROFSKY *Getty Images (fotografía)*; CORTESIA DE BEN J. HARRISON *Centro de Neuropsiquiatría de Melbourne, Universidad de Melbourne e Instituto de Alta Tecnología-PRBB, CRC Corporación Sanitaria, Barcelona (imágenes del cerebro)*; PRECISION GRAPHICS *(ilustración)*

TOC: UN IMPULSO CONSTANTE



Las personas que padecen trastorno obsesivo-compulsivo (TOC) comparan las obsesiones que les obligan a realizar una acción repetidamente con tics incontrolables. Existe una conexión entre ambos: los movimientos involuntarios del tipo de los observados en pacientes con enfermedad de Huntington se originan en los ganglios basales, un grupo de estructuras relacionadas con el inicio y la coordinación de las acciones motoras básicas. El núcleo caudado de los ganglios basales también forma parte del circuito cerebral asociado al TOC. A él también pertenecen la corteza orbitofrontal (región fundamental para la toma de decisiones y la elaboración de juicios morales) y el tálamo (que transmite e integra la información procedente de los sentidos). En quienes padecen TOC (*inserto, izquierda*), es manifiesta una hiperactividad en zonas de la corteza frontal y de los ganglios basales. La emisión de señales en esas regiones se halla más sincronizada que en los sujetos sanos (*inserto, derecha*).

El objetivo del tratamiento podría ser algo parecido a "reiniciar" un ordenador bloqueado.

adyacente. Este incluye la corteza orbitofrontal (área que participa en tareas complejas, del tipo de la toma de decisiones), el núcleo caudado ventral (en los ganglios basales) y el tálamo (que transmite e integra la información procedente de los sentidos).

Las pruebas de hiperactividad de este circuito en individuos con TOC no proceden únicamente de la obtención de neuroimágenes. La mayoría de los pacientes en tratamiento (ya sea con terapia conductual o con medicación) experimenta una profunda reducción de los síntomas, mejora que va sistemáticamente ligada a una disminución de la actividad de la corteza orbitofrontal. En pacientes que no responden a la medicación ni a la terapia conductual, también pueden reducirse los síntomas de un TOC grave desconectando físicamente la corteza orbitofrontal del núcleo caudado. Esta desconexión puede lograrse mediante el corte de las fibras nerviosas (axones) que los conectan o la inhibición de la actividad eléctrica a lo largo de las mismas. Este efecto tan claro, provocado por una alteración física de las conexiones de un circuito cerebral, respalda fuertemente la suposición de que los síntomas de las enfermedades mentales obedecen al funcionamiento anómalo de un circuito determinado.

Tanto en el TOC como en otras enfermedades mentales, la causa del funcionamiento incorrecto de un circuito es una cuestión aparte y puede presentar una gran complejidad. En algunos casos puede relacionarse con una vulnerabilidad preexistente. Del mismo modo que ciertas familias muestran una predisposición a padecer niveles altos de colesterol o hiperglucemia, las variaciones genéticas individuales también pueden afectar al desarrollo y al funcionamiento del cerebro. Sin embargo, al igual que en otros trastornos complejos, una predisposición genética no genera por sí sola la enfermedad. Normalmente, el entorno y las experiencias se suman a las vulnerabilidades de origen genético, de modo que provocan la enfermedad en unas personas pero no en otras.

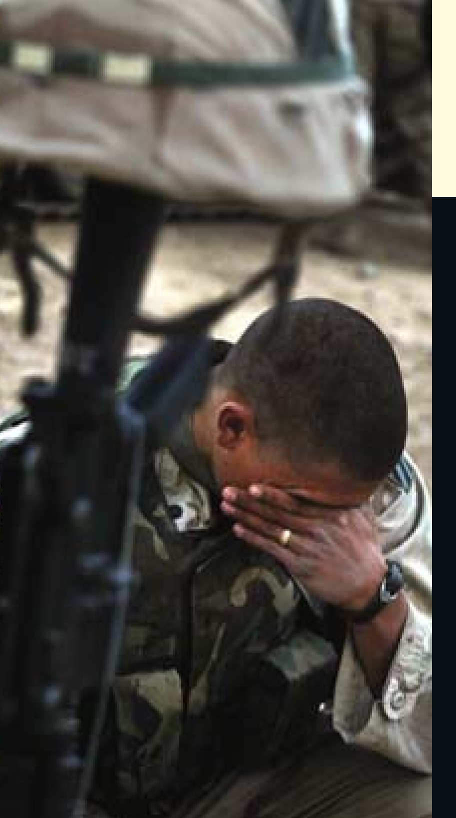
Olvidar el miedo

La idea de que tanto las experiencias como la fisiología individual del cerebro pueden provocar o agravar defectos en los circuitos cerebrales resulta particularmente útil a la hora de comprender las secuelas de un trauma.

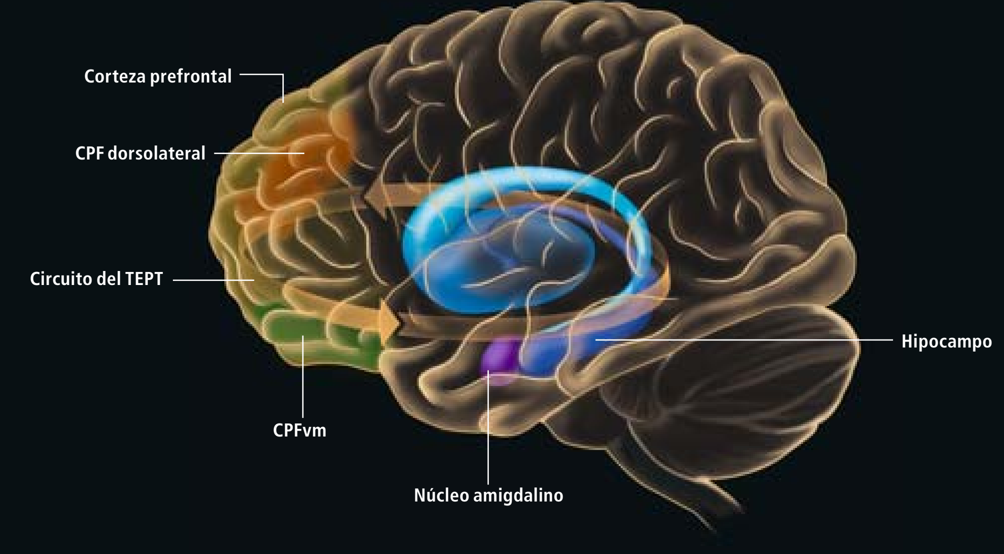
El trastorno por estrés postraumático (TEPT), antiguamente denominado "neurosis de combate" o "fatiga de batalla", es una de las aflicciones más frecuentes entre los veteranos de guerra. Hoy en día se considera un trastorno de ansiedad que incluye pensamientos molestos e incontrolables, ya sean reviviscencias (*flashbacks*) de un suceso traumático pasado, pesadillas, un elevado nivel de alerta o alteraciones del sueño. Cada vez más, este trastorno se detecta también en civiles víctimas

DAVID LEESON *Dallas Morning News/Corbis Sygma (fotografía)*; PRECISION GRAPHICS (*ilustración*)

EL TEPT Y EL PERPETUADOR DEL MIEDO



En el trastorno por estrés postraumático (TEPT), las señales evocadoras de una experiencia traumática provocan, aun mucho tiempo después, reacciones de miedo. Se cree que el funcionamiento incorrecto de una estructura cerebral denominada corteza prefrontal ventromedial (CPFvm) incrementa la vulnerabilidad ante este trastorno. La CPFvm modula el núcleo amigdalino, zona rectora del miedo y la ansiedad. En la recuperación posterior a un trauma, o "extinción" (un proceso de aprendizaje que reemplaza el miedo por una respuesta neutral), participan el hipocampo y la corteza prefrontal dorsolateral. Se cree que la CPFvm actúa como enlace fundamental entre la CPF dorsolateral y el núcleo amigdalino. La CPFvm calma al núcleo amigdalino y permite así que el aprendizaje durante la extinción elimine el miedo.



de casos de violación, terrorismo o accidentes de tráfico.

A primera vista, no parece probable que el TEPT tenga como origen una anomalía fisiológica: su propio nombre relaciona la causa con un acontecimiento externo (un trauma específico). Es de esperar que síntomas del tipo de alteraciones del sueño o un aumento del estado de alerta aparezcan inmediatamente después de una experiencia traumática, pero, en la mayoría de la gente, esos síntomas desaparecen de forma natural con el tiempo. Sin embargo, en el 20 por ciento de las víctimas de un trauma, el TEPT se desarrolla semanas o incluso meses después y los síntomas persisten: los enfermos continúan experimentando respuestas propias de un estrés agudo (básicamente, intensas reacciones de miedo) ante recuerdos u otras señales que evoquen el trauma original.

En psicoterapia, el proceso de reducir el miedo se denomina "extinción". Se basa en la exposición repetida a un determinado recuerdo o señal relacionado con el trauma pero sin consecuencias adversas. El paciente logra así disociar esa señal de la respuesta automática de miedo extremo que sufría; en su lugar, desarrolla una nueva respuesta neutra. El TEPT puede considerarse un fallo en el proceso de extinción, por lo que la recuperación (ya sea natural o mediante terapia) requiere un nuevo aprendizaje. Datos recientes obtenidos en estudios con animales y con humanos sugieren que un "circuito averiado" puede dificultar la extinción, lo que deja al individuo expuesto al TEPT.

En el cerebro, los centros clave del miedo los constituyen el núcleo amigdalino y un grupo de células adyacentes denominado núcleo del lecho de la estría terminal. Estas regiones dirigen prácticamente todos los síntomas del miedo: taquicardia, aumento de la sudoración, inmovilización y respuestas de sobresalto exageradas. Por un lado, las neuronas del núcleo amigdalino proyectan sus axones hacia los centros del tronco encefálico que controlan esas funciones autónomas; por otro, hacia regiones del prosencéfalo que afectan a la motivación, la toma de decisiones y la notoriedad de determinados estímulos. Pero si el núcleo amigdalino es el motor del miedo, algo debería provocar su desconexión cuando las condiciones cambian y el miedo ya no es necesario ni apropiado.

Estudios realizados por Greg Quirk y sus colaboradores, de la Universidad de Puerto Rico, demuestran que un área diminuta alojada en el interior de la corteza prefrontal de los roedores, la región infralímbica, resulta crucial para la extinción del miedo. Tras enseñar a los animales a desarrollar miedo ante un determinado estímulo, emplearon un tratamiento de extinción para eliminar la fobia.

El grupo de Quirk descubrió que la actividad en la región infralímbica aumentaba durante la extinción, ya que dicha zona ejercía a modo de freno sobre el núcleo amigdalino. De hecho, la microestimulación de las células de la región infralímbica parece reproducir la extinción incluso en animales que no han sido entrenados para superar el miedo. Además, el bloqueo de la función neural en esta diminuta región prefrontal impide la extinción en animales que sí han sido entrenados. Todo esto sugiere que, para superar el miedo, la actividad de esta región cerebral es tan necesaria como suficiente.

En los individuos que sufren TEPT, el estudio de las imágenes cerebrales apunta hacia una actividad anómala en la corteza prefrontal ventromedial (CPFvm), que es el equivalente de la región infralímbica de la rata. Cinco estudios han demostrado que, al ser expuestos a estímulos relacionados con el trauma, los sujetos que padecen TEPT muestran una actividad reducida en la CPFvm. Asimismo, estos pacientes presentan una CPFvm de menor tamaño que el observado en sujetos de referencia que han sufrido un trauma pero sin llegar a desarrollar un TEPT. En un estudio realizado en fecha reciente con voluntarios sanos, Mohammed Milad y sus colaboradores, del Hospital General de Massachusetts, señalaron que el espesor de esta región estaba directamente relacionado con la capacidad para extinguir los recuerdos asociados a situaciones de miedo. Por su parte, Elizabeth Phelps y colaboradores, de la Universidad de Nueva York, han demostrado que, al igual que en los roedores, los procesos de extinción del miedo en seres humanos implican un incremento de la actividad de la CPFvm, a la par que una disminución de la actividad del núcleo amigdalino.

La obtención de neuroimágenes ha permitido identificar las bases biológicas de la terapia cognitivo-conductual, un tratamiento conversacional centrado en modificar la respuesta de un paciente ante situaciones difíciles. Las imágenes muestran la importancia del hipocampo a la hora de evaluar el contexto y la de la corteza prefrontal dorsolateral a la hora de aprender a tolerar y superar el miedo. Sin embargo, la corteza prefrontal dorsolateral no está directamente conectada al núcleo amigdalino. Se cree que la CPFvm es el vínculo crucial entre ambos, así como el que permite que los tratamientos cognitivos den lugar a un nuevo aprendizaje y a la recuperación.

El autor

Thomas R. Insel, psiquiatra y neurólogo, es director del estadounidense Instituto Nacional de Salud Mental. Sus primeras investigaciones clínicas revelaron la función de la serotonina en el trastorno obsesivo-compulsivo. Sus estudios en animales sobre la neurobiología subyacente a la pertenencia a un grupo social identificaron la función que desempeñan los receptores cerebrales de oxitocina y otras sustancias en la creación de vínculos sociales. A la hora de describir la relación entre los circuitos neurales y los trastornos del estado de ánimo, Insel se esfuerza por salvar las distancias entre la biología y la psiquiatría, resaltando la relación entre la actividad neural y el comportamiento.

Los estudios sobre los circuitos cerebrales no sólo ponen de manifiesto que determinados tratamientos funcionan, sino también qué modificaciones inducen dichas terapias en la actividad cerebral y por qué funcionan.

Una transformación fundamental

Todos los ejemplos tratados hasta ahora sugieren la existencia de una correlación entre la actividad de un circuito cerebral específico (formado por regiones del cerebro interconectadas) y los síntomas característicos de la enfermedad.

En todos los casos interviene la corteza prefrontal. Esto no resulta sorprendente, ya que la CPF es una región cerebral que, en humanos, exhibe un desarrollo mayor que en otros mamíferos. Si bien esta circunstancia hace difícil su estudio en animales, también sugiere que la CPF constituye un componente fundamental de lo que nos hace humanos. Se cree que la CPF opera a modo de "gobernador general" del cerebro: es allí donde se procesan nuestros objetivos y motivaciones más complejos con el fin de tomar decisiones y planificar el futuro.

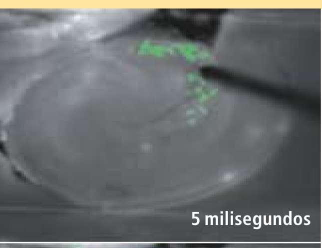
Sin embargo, en cada una de las enfermedades descritas parecen intervenir distintas estructuras de la CPF. Además, las distintas regiones interconectadas implicadas difieren de una patología a otra. Al margen de los ejemplos tratados aquí, también se ha observado un funcionamiento anómalo de la corteza prefrontal dorsolateral en pacientes con esquizofrenia. Así mismo, en niños de entre 7 y 12 años que padecen trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH), se han observado retrasos en el desarrollo de la totalidad de la CPF.

Aunque esas correlaciones parecen convincentes, son necesarias más investigaciones para establecer con exactitud qué aspectos de la actividad cerebral se encuentran en el origen de estas y otras enfermedades mentales. Es de esperar que el estudio de los factores genéticos que incrementan el riesgo de padecer determinadas enfermedades mentales también ayude a desvelar los mecanismos fisiológicos implicados.

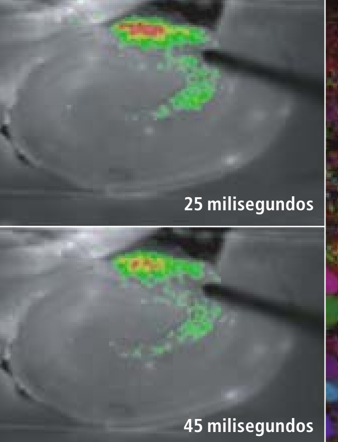
Identificar las relaciones entre las anomalías en los circuitos cerebrales y las enfermedades a las que éstas dan origen podría tener amplias repercusiones tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de dichas patologías. A día de hoy, los trastornos mentales se clasifican aún en función de sus síntomas. No obstante, éstos pueden solaparse en multitud de enfermedades. Por otro lado, tampoco se relacionan con indicios biológicos concretos. Una reclasificación de las enfermedades fundamentada en la fisiología cerebral podría dar lugar a técnicas de diagnóstico basadas en biomarcadores (señales biológicas como, por ejemplo, pautas de actividad cerebral o cambios químicos o estructurales). Al igual que en las demás áreas de la medicina se emplean los análisis de sangre, las mediciones electrofisiológicas o las imágenes obtenidas con escáner, los marcadores biológicos característicos ayudarían a identificar con mayor precisión y prontitud las enfermedades mentales.

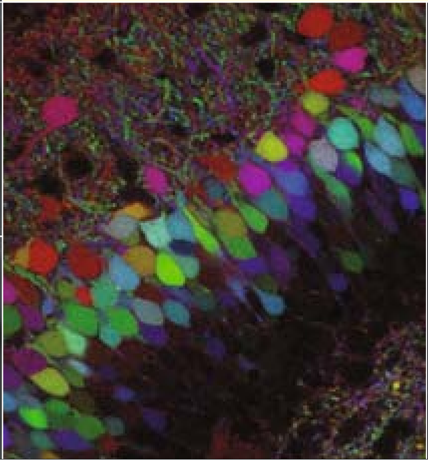
En la actualidad, uno de los criterios para diagnosticar la esquizofrenia es un episodio de psicosis, del mismo modo en que hubo un tiempo en que la enfermedad coronaria se

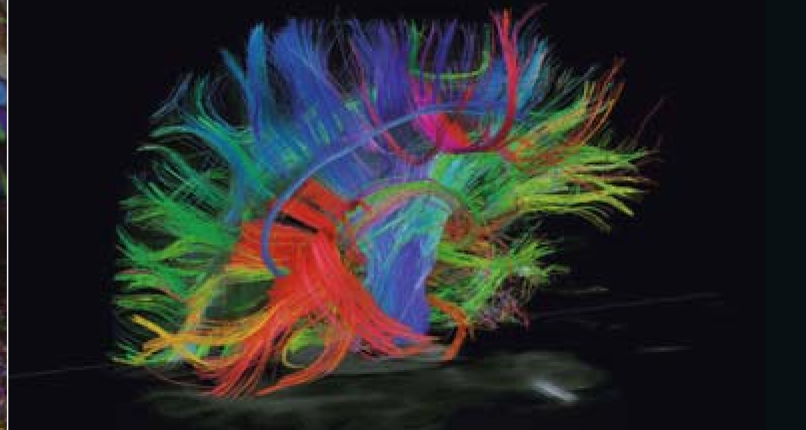
MEJORES VISTAS AL CEREBRO



Las nuevas técnicas de obtención de neuroimágenes ampliarán y refinarán los conocimientos sobre las disfunciones subyacentes a los trastornos de los circuitos cerebrales. En el hipocampo de una rata (*izquierda*), un colorante sensible al voltaje emite fluorescencia de color rojo allí donde la excitación neuronal es más intensa. Mediante ingeniería genética, se han obtenido ratones cuyas neuronas emiten fluorescencia de múltiples colores: ofrecen una panorámica denominada "arco íris cerebral" que refleja las estructuras que se desarrollan en el cerebro del ratón (*abajo, en el centro*). Las imágenes obtenidas mediante un espectro de difusión, que emplea datos de imágenes por resonancia magnética para resaltar las fibras nerviosas que conectan las diferentes partes del cerebro humano, facilitan el estudio de los circuitos defectuosos (*abajo, a la derecha*).







TOMADO DE "HIGH-SPEED IMAGING REVEALS NEUROPHYSIOLOGICAL LINKS TO BEHAVIOR IN AN ANIMAL MODEL OF DEPRESSION", POR KARL DEISSEROTH ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 317; 10 DE AGOSTO DE 2007. REPRODUCIDO CON PERMISO DE AAAS (*hipocampo*); GETTY IMAGES (*arco iris cerebral*); CORTESIA DE VAN J. WEDEEN *Hospital General de Massachusetts* (*fibras*)

DIAGNOSTICO Y TRATAMIENTO

La gran distancia que separa el tratamiento de un trastorno mental del tratamiento de una enfermedad "corporal" (una cardiopatía, por ejemplo) obedece a las diferencias en los conocimientos sobre los fundamentos biológicos de la enfermedad. Comprender bien la disfunción de los circuitos cerebrales hará posible un diagnóstico precoz (mediante la obtención de imágenes cerebrales y, posiblemente, mediante análisis de sangre que detecten "marcadores" genéticos o proteínicos). Posteriormente, las intervenciones se podrán dirigir de forma mucho más eficiente.



TRATAMIENTO DE LA DEPRESION: PASADO, PRESENTE Y FUTURO

	1960	2010	OBJETIVOS PARA 2020
Indicadores del riesgo	Ninguno	Débiles (antecedentes familiares, antecedentes del trauma)	Fuertes (genes, proteínas, imágenes cerebrales)
Diagnóstico	Entrevistas	Entrevistas	Imágenes cerebrales, biomarcadores, entrevistas
Intervenciones	Internamiento, terapia electroconvulsiva, coma insulínico	Antidepresivos, terapia cognitiva	• Preventivas: terapia cognitiva o vacunas • Tratamientos personalizados: medicación mejorada, terapia cognitiva, estimulación cerebral
Resultados	Riesgo de recaída elevado, mortalidad elevada	El 50 por ciento responde a las 12 semanas, riesgo de recaída elevado, mortalidad elevada	Respuesta a las 24 horas, riesgo de recaída reducido, mortalidad reducida

identificaba a partir de un ataque al corazón. En el caso de las enfermedades cerebrales, los síntomas cognitivos y conductuales puede que sean sólo manifestaciones tardías del funcionamiento anómalo de un circuito, por lo que condicionar el inicio de una terapia a la aparición de dichos síntomas podría resultar insuficiente. En la enfermedad de Parkinson, los síntomas surgen únicamente cuando el 80 por ciento de las células de la sustancia negra del cerebro productoras de dopamina ya se han deteriorado. En la enfermedad de Huntington, los problemas motores se hacen evidentes sólo tras haberse perdido el 50 por ciento de las neuronas de los ganglios basales.

En cada caso, el tipo de intervenciones dependerá de la naturaleza de la enfermedad. Los estudios sobre los circuitos cerebrales no sólo han puesto de manifiesto que determinados tratamientos (como la terapia cognitivo-conductual) resultan eficaces, sino también qué modificaciones inducen dichas terapias en la actividad cerebral y, por tanto, cómo y por qué funcionan. Todos estos conocimientos podrían utilizarse para mejorar las técnicas terapéuticas ya existentes. Muchos de los medicamentos antidepresivos y antipsicóticos de hoy en día también resultan eficaces, pero no más que los fármacos de hace cuarenta años. Con toda probabilidad, un mejor conocimiento de las disfunciones fisiológicas del cerebro dará lugar a tratamientos mejor dirigidos y más eficientes.

Es posible que el resultado más inmediato de considerar las enfermedades mentales como trastornos de base fisiológica sea un cambio en la percepción popular de estos trastornos. Históricamente, las personas con enfermedades mentales han sido estigmatizadas, tachadas de poseídas, peligrosas, sin fuerza de voluntad o víctimas de malos tratos por parte de sus progenitores. La ciencia no respalda ninguna de estas opciones. Un enfoque científico de las enfermedades mentales permitiría que aquellos que luchan contra estos trastornos recibieran una aceptación plena y el tratamiento de calidad que merecen.

Desde el punto de vista científico, resulta difícil encontrar en la medicina un precedente del fenómeno que hoy en día está viviendo la psiquiatría. La base intelectual de este campo está dejando de ser una disciplina basada en fenómenos "mentales" subjetivos para convertirse en otra: la neurociencia. Es muy probable que la base científica que guía el desarrollo actual de este campo revolucione la prevención y el tratamiento de las enfermedades mentales y proporcione un alivio real y duradero a millones de personas en todo el mundo.

MARK HARMEL *Photo Researchers, Inc.*

Bibliografía complementaria

TARGETING ABNORMAL NEURAL CIRCUITS IN MOOD AND ANXIETY DISORDERS: FROM THE LABORATORY TO THE CLINIC. Kerry J. Ressler y Helen S. Mayberg en *Nature Neuroscience*, vol. 10, n.º 9, págs. 1116-1124; septiembre de 2007.

NEURAL CIRCUITRY UNDERLYING THE REGULATION OF CONDITIONED FEAR AND ITS RELATION TO EXTINCTION. Mauricio R. Delgado y col. en *Neuron*, vol. 59, n.º 5, págs. 829-838; 11 de septiembre de 2008.

DISRUPTIVE INSIGHTS IN PSYCHIATRY: TRANSFORMING A CLINICAL DISCIPLINE. Thomas R. Insel en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 119, n.º 4, págs. 700-705; 1 de abril de 2009.

La vida secreta de las Trufas

Más allá del refinamiento gastronómico, las trufas desempeñan funciones ecológicas esenciales

James M. Trappe y Andrew W. Claridge

Es un frío día de noviembre cerca de Bolonia. Vagamos por los bosques con Mirko Illice, un cazador de trufas o trufero, y su perrito, Clinto. Clinto corretea entre las encinas, olisqueando el suelo, deteniéndose y echando a correr de nuevo. De pronto se para y empieza a excavar furiosamente con ambas patas. "¡Ah! Ha encontrado una trufa blanca italiana", explica Mirko. "Sólo cuando descubre una de éstas utiliza ambas patas." Mirko aparta despacio del lugar a su can excitado e introduce sus dedos en el suelo. Extrae un burujo de color pardo amarillento del tamaño de una pelota de golf y lo huele. "*Benissimo*, Clinto", exclama Mirko. Aunque no es el mejor ejemplar de la especie (*Tuber magnatum*, que crece sólo en Italia septentrional, Serbia y Croacia), el hallazgo de Clinto conseguirá un magnífico precio, unos 40 euros, en el mercado sabatino.

Las trufas han formado parte de la gastronomía y del folklore a lo largo de la historia. El faraón Khufu las servía en su mesa real. Beduinos, bosquimanos del Kalahari y aborígenes australianos las han recolectado durante incontables generaciones en los desiertos. Los romanos las saboreaban y pensaban que las producía el trueno.

Los modernos gastrónomos aprecian las trufas por su aroma y sabor térreos. Están dispuestos a pagar precios exorbitantes por ellas en el mercado (hace poco, la variedad blanca italiana superó los 2200 euros por kilogramo). Pero a pesar del constante interés del hombre por las trufas, muchas de sus características biológicas han constituido durante tiempo un misterio. Sin embargo, en las dos últimas décadas, los análisis genéticos y las observaciones de campo han esclarecido los orígenes y las funciones de esos organismos. Han revelado que desempeñan funciones críticas en numerosos ecosistemas. Los hallazgos se utilizan para elaborar estrategias de conservación de algunas especies amenazadas que dependen de esos habitantes del suelo.

CONCEPTOS BASICOS

- Las trufas que aparecen en los menús de los restaurantes y en los estantes de las tiendas de alimentos selectos representan sólo una pequeña fracción de las especies de trufas.
- Las trufas, que desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas, nutren por igual a plantas y animales.
- Reconocer la importancia ecológica de las trufas contribuye a la conservación de las especies amenazadas que dependen de aquéllas.

Un hongo entre nosotros

Las trufas, al igual que las setas, son el fruto de los hongos. Son órganos carnosos, estructuras reproductoras temporales que producen esporas, células que finalmente germinan y dan origen a nuevos descendientes. Lo que distingue a las trufas de las setas es su fruto hipogeo, formado bajo tierra. Desde un punto de vista técnico, las trufas verdaderas son hongos pertenecientes al grupo de los ascomicetos que se comercializan como alimento. Pero existen hongos del grupo de los basidiomicetos parecidos a trufas, las "trufas falsas", que cursan como trufas verdaderas. Debido a tales semejanzas, denominamos trufas a todos los hongos blandos que fructifican bajo tierra.

El empeño de la ciencia en revelar los secretos de las trufas data del siglo XIX, cuando ciertos alemanes interesados en el cultivo de trufas le pidieron al botánico Albert Bern-

JOERG LEHMANN *Getty Images*





LUCY READING-IKKANDA

hard Frank que investigara la propagación de esas exquisiteces. Los estudios de Frank demostraron que los hongos crecían sobre las minúsculas raicillas tróficas que los árboles usaban para absorber agua y nutrientes del suelo, así como en el interior de las mismas. Dedujo así que ambos organismos establecían una relación simbiótica, en la que cada especie proporcionaba nutrientes a la otra. Además, postuló que las simbiosis entre hongos subterráneos y plantas se hallaban muy extendidas, y que modelaba el crecimiento y la salud de numerosas comunidades vegetales.

Las teorías de Frank contradecían la opinión recibida sobre las trufas y otros hongos; a saber, que todos ocasionaban enfermedades y podredumbre en las plantas. Obtuvieron el rechazo de sus colegas. Aunque habría de transcurrir casi un siglo antes de que los estudiosos lograran pruebas definitivas, Frank acertó en sus deducciones.

Todas las trufas y las setas producen redes de filamentos, las hifas, que crecen entre las raicillas de las plantas para formar un órgano de absorción compartido: la micorriza. Así conectados, el hongo suministra a la planta nutrientes y agua esenciales, al poder alcanzar sus hifas minúsculas bolsas de suelo que son inaccesibles a las raíces mucho mayores de las plantas. La planta, a su vez, proporciona a su consorte azúcares y otros nutrientes que genera durante la fotosíntesis, productos que el hongo necesita pero no puede sintetizar por carecer de tal función. Tan fructífera es la colaboración, que de ella dependen la vida de árboles y plantas leñosas, así como de los hongos asociados. La mayoría de las herbáceas (las que no poseen un tallo leñoso) forman también micorrizas, aunque con hongos diferentes.

Muchas especies fúngicas, entre ellas las que producen trufas, forman ectomicorrizas, un tipo de micorrizas que envuelven las raicillas nutricias con un tejido externo protector. La diversidad de los hongos ectomicorrícicos es impresionante: uno de los autores (Trappe) estima que hay unas 2000 especies asociadas con el abeto de Douglas (conífera de la que se extrae madera y se aprovecha como árbol de Navidad); probablemente existen otras tantas especies, o más, asociadas con los eucaliptos australianos. Numerosas especies de árboles,

Los autores

James M. Trappe es científico emérito del Servicio Forestal de los Estados Unidos y profesor de ciencia forestal en la Universidad estatal de Oregón. Ha descubierto más de 200 especies de trufas en cinco continentes. **Andrew W. Claridge**, investigador del departamento de medio ambiente, cambio climático y agua de Nueva Gales del Sur, colabora también con la Universidad de Nueva Gales del Sur. Desde hace más de 20 años viene estudiando las interrelaciones entre los mamíferos y los hongos con que se alimentan.

importantes desde un punto de vista económico y ecológico, se sirven de hongos ectomicorrícicos. La mayoría de esos hongos producen setas, pero se cuentan por miles las especies que producen trufas.

Bajo tierra

La comparación de morfologías y de secuencias génicas entre especies de setas y trufas indica que la mayoría de las últimas ha evolucionado a partir de las primeras. Pero, puesto que las trufas necesitan la dispersión aérea de sus esporas para propagarse, ¿por qué habría favorecido la selección natural la evolución de especies que se esconden bajo tierra?

Considere el lector la táctica reproductora de las setas. A pesar de la diversidad de estructuras y colores, todas poseen cuerpos fructíferos que liberan esporas directamente al aire. Las esporas pueden caer sobre el suelo, cerca o lejos de su origen, para germinar y establecer una nueva colonia asociada a las raíces de una planta simbionte compatible. Se trata de una estrategia muy eficaz, pero no infalible.

La mayoría de las setas cuentan con escasas defensas frente a los peligros ambientales como el calor, los vientos desecantes, las heladas y los animales que buscan sustento. Cada día maduran y se liberan unas cuantas esporas, pero si el tiempo inclemente seca o hiela una seta, se interrumpe la producción de esporas.

Donde el entorno ejerce esa presión de modo recurrente, han surgido nuevas adaptaciones evolutivas. La solución más ventajosa ha consistido en fructificar bajo tierra. Una vez el suelo alcanza suficiente humedad, se forma un cuerpo fructífero subterráneo, que queda protegido de las bruscas oscilaciones ambientales. La trufa produce y nutre sus esporas, aun cuando las condiciones por encima del suelo resulten intolerables para las setas.

A primera vista, la estrategia de la trufa parece fácil. La forma de la trufa es visiblemente menos compleja que la de una seta. El hongo ya no necesita consumir energía para hacer emerger desde el suelo sus tejidos portadores de esporas, sobre un pedúnculo, o para desarrollar un sombrero u otra estructura para producir y liberar esporas. La trufa no es más que un burujo de tejido portador de esporas, generalmente envuelto por una capa protectora.

El inconveniente de tal estructura es la imposibilidad de liberar las esporas, al hallarse las trufas atrapadas en el suelo. Se requiere, por tanto, un sistema de dispersión nuevo. Y ahí reside la complejidad de las trufas. A lo largo de millones de años, a medida que las trufas se retiraban bajo tierra, diversas mutaciones llevaron a la aparición de compuestos aromáticos que eran atractivos para los animales. Cada especie de trufa posee su propia dotación de aromáticos; aunque inapreciables en los ejemplares inmaduros, se intensifican y se desprenden cuando las esporas maduran.

De los miles de especies de trufas que existen, sólo unas docenas son apreciadas por el hombre. El resto resultan demasiado pequeñas o demasiado duras, poseen aromas de escaso interés o absolutamente repugnantes. Sin embargo, para otros animales son irresistibles. Los micromamíferos, como ratones, ardillas y conejos en el hemisferio norte, y canguros rata, armadillos y suricatas en el hemisferio sur, constituyen las principales especies seducidas por los olores de las trufas. Pero sus parientes de mayor tamaño (ciervos, osos, papiones y ualabíes, entre otros) buscan también los hongos clandestinos.

Los propios moluscos se sienten atraídos por las trufas. Y hay insectos que pueden nutrirse de las trufas o depositar en ellas los huevos para que sus larvas encuentren una fuente de alimentación tras la eclosión.

Al consumir una trufa, los animales digieren la mayor parte de su carne. Pero las esporas atraviesan el tubo digestivo sin sufrir daño y se expulsan con las heces en el suelo, donde pueden germinar si encuentran condiciones idóneas. Este sistema de dispersión ofrece ventajas respecto al que emplean las setas. Las heces concentran las esporas en un determinado sitio, a diferencia de la diseminación aérea, que provoca una dispersión más difusa. Además, las heces suelen depositarse en el mismo tipo de ambientes donde los animales buscan las trufas, en contraposición con el transporte más aleatorio de las esporas aventadas. La semejanza del entorno es beneficiosa porque aumenta la probabilidad de que las esporas vayan a parar cerca de las especies de plantas apropiadas con las que establecer micorrizas.

Sin embargo, no todas las trufas se sirven del olor para atraer a los animales. En Nueva Zelanda, que carece de mamíferos terrestres nativos, algunas trufas han adquirido los tonos del arco iris para imitar los colores de los frutos apreciados por las aves locales. La trufa *Paurocotylis pila*, por ejemplo, brota de la tierra al tiempo que se expande y se instala sobre el suelo del bosque. Presenta el aspecto de la base roja y rechoncha, parecida a una baya, de las semillas de los árboles del género *Podocarpus*, alimento favorito de las aves. (Aunque tales hongos de colores vivos emergen del suelo, se consideran igualmente trufas, porque sus tejidos portadores de esporas se hallan envueltos por una cubierta y dependen de los animales para dispersar sus esporas.)

En contados grupos, en especial la cosmopolita familia de las Elafomicetáceas y la familia

CONSUMIDORES DE TRUFAS

Los animales que aparecen aquí figuran entre los muchos que se alimentan de trufas


Potorú patilargo


Suricata


Kiwi moteado grande

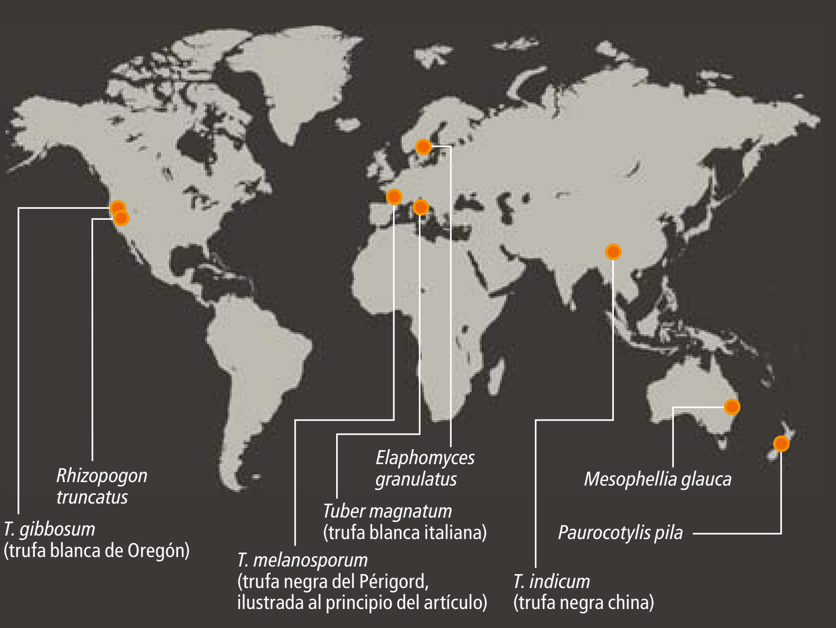

Papión negro o chacma


Oso pardo

CORTESIA DE BEN WRIGLEY *National Parks and Wildlife Service (potorú patilargo)*; MILLARD H. SHARP *Photo Researchers, Inc. (suricata)*; CHRISTOPHE COURTEAU *Nature Picture Library (kiwi)*; NIGEL J. DENNIS *Photo Researchers, Inc. (papión negro o chacma)*

Dónde crecen las trufas

Las especies de trufas se cuentan por millares. El mapa muestra lugares representativos donde las trufas mencionadas en el artículo crecen silvestres. La mayor diversidad de especies conocidas se encuentra en la Europa mediterránea, Norteamérica occidental y Australia, regiones caracterizadas por inviernos fríos y lluviosos y veranos cálidos y secos. Gracias a su vida subterránea, las trufas están protegidas del calor, la sequía y las heladas que de otro modo afectarían la fructificación.





INVASORES E IMPOSTORES

La trufa negra del Périgord está amenazada por una invasora: la trufa negra china. Hace tiempo que los investigadores temían que la abundante y adaptable trufa china se extendiera por el ámbito de la trufa del Périgord, más exigente, y posiblemente desbancarla. En 2008, el grupo de Claude Murat, de la Universidad de Turín, informó que esa posibilidad se había hecho realidad: el grupo detectó ADN de la trufa del Périgord y de la china en los ápices de raíces y en el suelo de una plantación trufera italiana.

Proveedores deshonestos intentan a veces hacer pasar la trufa china, mucho más común, por su pariente más rara y sabrosa, mezclando pequeñas cantidades de trufa del Périgord con la variedad china, para que ésta adquiera el olor adecuado. Se han utilizado análisis de ADN para identificar trufas chinas que pasan por la especie del Périgord.

de las Mesofeliáceas, endémica de Australasia, la evolución ha creado otro mecanismo de dispersión. Sus esporas maduras constituyen un polvo, no un tejido carnoso y portador de esporas. El polvo de *Elaphomyces granulatus*, por ejemplo, está confinado dentro de una gruesa corteza que, ingerida por el animal, libera las esporas. Algunas mesofeliáceas presentan una estructura similar; otras, como *Mesophellia glauca*, poseen una masa pulverulenta de esporas intercalada entre una corteza externa delgada y un núcleo central comestible.

Las esporas de las trufas que no han sido engullidas pueden dispersarse de otras maneras. Después de la maduración, se descomponen en el suelo en una suspensión viscosa, infestada de larvas. Los invertebrados se alimentan de ese tejido en putrefacción o se desplazan por encima del mismo y, al hacerlo, retienen las esporas que luego desprenderán en otro lugar.

Las esporas de trufas viajan también cuando los animales depredadores capturan pequeñas presas que se alimentan de trufas; lechuzas y halcones pueden transportar roedores saciados de trufas a distancias notables, hasta sus nidos o reposaderos, donde devoran sus presas enteras, o bien las evisceran y desechan las entrañas. En cualquiera de ambos supuestos, las esporas retornan al suelo, donde pueden dar origen a nuevas trufas.

Juntos para siempre

La evolución similar de las trufas en los dos hemisferios de la Tierra resulta sorprendente, a pesar de haber sucedido mucho después de la separación de los continentes. En una región las plantas simbiontes difieren de las simbiontes de la otra; mientras que en el norte los pinos, las hayas y las encinas forman asociaciones con las trufas, en el sur ese papel lo desempeñan los eucaliptos y los robles australes (*Nothofagus*). Difieren también las especies de trufas y animales de un hemisferio y otro. Pero los ecosistemas y sus componentes (árboles, trufas y animales) funcionan de manera muy parecida.

La mayor diversidad conocida de trufas se encuentra en las áreas templadas de la Europa mediterránea, Norteamérica occidental y Australia, aunque no se han explorado todavía la mayor parte de Asia, Africa y Sudamérica.

Se trata de áreas de climas con inviernos fríos y lluviosos, y veranos cálidos y secos. Las estaciones de fructificación de los hongos suelen ser la primavera y el otoño, caracterizados por un tiempo errático: algunos años traen episodios cálidos y secos; en otros hiela. Ambas situaciones son adversas para las setas. Por ello, a lo largo del tiempo, la selección natural favoreció a los hongos que buscaron refugio bajo tierra en las regiones mencionadas.

LUCY READING-IKKANDA (*mapa*); CORTESIA DE JAMES M. TRAPPE (*M. glauca*); CORTESIA DE MATT TRAPPE (*R. truncatus*); CORTESIA DE MICHAEL CASTELLANO Y JAMES M. TRAPPE (*P. pila*)

Trufas y truficultura en España

En los últimos años, el interés por el cultivo de la trufa en España ha aumentado de forma exponencial. Varias razones han llevado a muchos inversores, propietarios forestales y agricultores de base a buscar, en el cultivo de la trufa, una alternativa rentable al actual uso del territorio en el ámbito rural. Entre ellas, los elevados precios, periódicamente noticiados, del mercado de la trufa, el prestigio gastronómico creciente del hongo, la posibilidad real de su cultivo en amplias zonas del territorio español y la reciente congelación de la obsesiva actividad urbanística en espacios naturales.

En la actualidad, se estima que entre el 30 y el 40 por ciento de la producción mundial de la trufa negra (*Tuber melanosporum*), conocida en los mercados internacionales como trufa de Périgord, es de origen español. Procede principalmente de las provincias de Teruel, Huesca, Castellón, Lérida, Barcelona, Soria y Guadalajara, y también de otras, como Navarra, Cuenca, Albacete, Granada, Jaén e incluso, esporádicamente, de Murcia. Conviene resaltar en este punto el valor ecológico y filogenético de las poblaciones más meridionales, pues se considera que pudieron actuar como refugio de la especie durante las últimas glaciaciones. Y así se sugiere que parte de las poblaciones actuales de Francia y del norte de España se expandieron desde el sur, siguiendo las rutas migratorias de sus plantas hospedantes, sobre todo robles, encinas y coscojas.

El inusitado interés por la truficultura en nuestro país se ha correspondido, en parte, con un mayor conocimiento sobre la diversidad, filogenia, biología y ecología de las trufas, y con el estudio de su importancia en los ecosistemas y sus condiciones de cultivo. A ello han contribuido los distintos grupos de investigadores liderados por S. Reyna, en Valencia, A. de Miguel, en Pamplona, F. Martínez-Peña, en Soria, C. Palazón, en Zaragoza, C. Colinas, en Lérida, L. G. García-Montero, en Madrid, J. L. García-Manjón en Alcalá de Henares y por mí mismo, en Murcia. También cabe destacar la labor de los truficultores, que poco a poco han ido comprendiendo las ventajas que les reporta su colaboración con los centros de investigación, abandonando el ocultismo que tradicionalmente ha caracterizado al sector.

Por otro lado, M. P. Martín, en Madrid, y L. Martínez-Suz y A. Morte, en Murcia, han conseguido avances espectaculares gracias a los estudios moleculares. Con ellos es posible detectar en campo diferentes especies de trufas (negra, de verano, de desierto, etcétera) sin necesidad de aguardar a su fructificación. Sin embargo, algunos aspectos, en especial los relativos al ciclo biológico, siguen siendo una incógnita y representan el gran reto científico del futuro inmediato. Falta determinar el umbral mínimo de biomasa miceliar para la formación y ulterior desarrollo de las estructuras reproductoras, las fases asexuales del hongo, los requisitos nutricionales e hídricos durante cada una de las etapas de maduración de las distintas especies de trufa, etcétera. Las aplicaciones biotecnológicas para conseguir un óptimo crecimiento del micelio y el control de la micorrización en vivero y campo abren igualmente nuevos horizontes al conocimiento de la biología de las trufas y la truficultura.

El desarrollo de estos nuevos cultivos no se limita al de la trufa negra (*T. melanosporum*). Se aplica también al de la trufa de verano (*Tuber aestivum*) y las trufas de desierto —también conocidas como turmas o criadillas— del género *Terfezia*, entre ellas, *T. claveryi*, *T. arenaria* y *T. leptoderma*. Es cierto que se da prioridad a la primera por su alta cotización en el mercado, con un precio medio de unos 350 euros por kilogramo (aunque puedan alcanzar los 1200 euros, como ha ocurrido a finales de la campaña de 2010), frente a los 80 euros de la de verano y los 50 euros de las de desierto. Sin embargo, las producciones por hectárea de *Terfezia* son muy superiores: pueden llegar hasta los 600 kilogramos por hectárea (como hemos podido comprobar en nuestros trabajos en Murcia) frente a los 80 kilogramos máximos estimados para las plantaciones de trufa negra. La consideración de todas esas especies amplía a prácticamente todo el territorio nacional la superficie potencial de los distintos cultivos truferos.

Cultivos todos ellos compatibles con la conservación de la biodiversidad y respetuosos con el medio: no consumen productos fitosanitarios ni fertilizantes y exigen un escaso riego. Además, presentan un elevado reclamo social (turismo trufero), lo que contribuye a disminuir el éxodo de la población rural, y producen beneficios económicos. Por todo ello, el cultivo de la trufa se puede considerar un paradigma de la sostenibilidad.

Mario Honrubia
Departamento de biología vegetal
Universidad de Murcia



Plantación trufera de encinas con *Tuber melanosporum*, en Teruel. Se aprecian los "quemados", zonas casi desprovistas de vegetación por el efecto alelopático del micelio.

MARIO HONRUBIA

Aunque se ignora cuándo se desarrollaron las primeras trufas, se han descubierto ciertos indicios sobre sus orígenes. Las ectomicorrizas fósiles más antiguas registradas datan de hace unos 50 millones de años. Y los antepasados de las especies actuales de pinos y otros árboles con los que las trufas se asocian surgieron hace unos 85 millones de años. Por tanto, podemos suponer que las trufas aparecieron hace entre 50 y 85 millones de años.

Dada la antigüedad de la simbiosis entre ambos organismos, no es de extrañar que las trufas desempeñen un papel principal en la ecología de muchos hábitats. Esenciales para la vida de numerosas especies de plantas, de ellas depende la alimentación de muchos ani-

males. En los Estados Unidos, el topillo occidental dorsirrojo cuenta con las trufas como medio exclusivo de sustento. Y la ardilla voladora septentrional, que habita en Norteamérica, se nutre principalmente de trufas cuando están disponibles en la naturaleza.

En el otro extremo del globo, en Australia, el canguro rata o potorú patilargo subsiste con una dieta compuesta en un 95 por ciento por trufas. Sus parientes marsupiales, los demás canguros rata y los bandicuts se sirven en gran medida de las trufas para sobrevivir. Y otros muchos animales de todo el mundo complementan su alimentación básica con esos hongos.

El conocimiento cada vez mayor de la estrecha relación entre las trufas, sus simbiontes vegetales y sus transportadores animales está guiando los esfuerzos de los truficultores y de los conservacionistas. En Oregón, en los años ochenta, los grupos de Mike Castellano, del Servicio Forestal estadounidense, y de Mike Amaranthus, de Mycorrhizal Applications, inocularon esporas de especies resistentes de trufas del género *Rhizopogon* a plantones de árboles de vivero para soportar la sequía y otras condiciones estresantes. Cabe suponer que, en el futuro, los truficultores aumenten sus beneficios sustituyendo las trufas del género *Rhizopogon* por trufas de *gourmet*. Además, las explotaciones silvícolas de árboles de Navidad del Pacífico noroccidental podrían producir la deliciosa trufa blanca de Oregón, *Tuber gibbosum*. Sin embargo, los intentos de inocular árboles con esa especie de trufa no siempre han tenido éxito.

Uno de los autores (Claridge) ha utilizado desde hace tiempo las trufas para determinar el tamaño de las poblaciones de animales amenazados en el sudeste de Australia, un parámetro necesario para el desarrollo de programas de protección o recuperación de esas especies. Claridge empapa almohadillas de espuma con aceite de oliva en el que se han instilado aromáticos de la trufa negra del Périgord (uno de los bocados favoritos de los humanos), originaria de Europa, para atraer potorúes y otros marsupiales hacia lugares donde son fotografiados por cámaras digitales sensibles al movimiento. Aplicando ese método, ha registrado un número de animales 50 veces mayor que con el método clásico de capturas con jaulas. Si la eficacia es tan elevada con el aceite de una trufa exótica, utilizada por el autor porque era fácil de adquirir, ¿qué cifras se podrían obtener con los olores de las trufas australianas naturales? Dar respuesta a esa pregunta constituye la máxima prioridad de su equipo.

Para proteger a los marsupiales en peligro y a otros animales que consumen trufas con regularidad, los conservacionistas deberán asegurar la disponibilidad del alimento en el entorno de los animales. Esta medida ayudará no sólo a los animales que dependen directamente de las trufas, sino también a sus depredadores. Así, restaurar el hábitat del amenazado cárabo manchado en el Pacífico noroccidental exige satisfacer las necesidades de su presa principal, la ardilla voladora septentrional, que se alimenta sobre todo de trufas.



HORMONAS, AROMAS Y OTRAS MOLECULAS

Las trufas negras del Périgord contienen androstenol, una hormona sexual que se encuentra en la saliva de los cerdos macho. El compuesto se encuentra asimismo en las glándulas sudoríparas humanas.

Tiempo atrás, los cazadores de trufas utilizaban cerdas para localizar los hongos hipogeos. Ahora, con frecuencia creciente, se recurre a los perros, que se muestran más dispuestos a aceptar una recompensa alimenticia por sus esfuerzos.

La mayoría de los aceites de trufa comercializados están sazonados con compuestos sintéticos, como el 2,4-ditiapentano, una de las muchas moléculas que confieren a la trufa blanca italiana su aroma distintivo.

Algunas trufas contienen compuestos que poseen potentes efectos antituberculosos; otros presentan fuertes propiedades antiinflamatorias y antioxidantes.

Bibliografía complementaria

FIELD GUIDE TO NORTH AMERICAN TRUFFLES: HUNTING, IDENTIFYING, AND ENJOYING THE WORLD'S MOST PRIZED FUNGI. Matt Trappe, Frank Evans y James M. Trappe. Ten Speed Press, 2007.

TAMING THE TRUFFLE: THE HISTORY, LORE, AND SCIENCE OF THE ULTIMATE MUSHROOM. Ian R. Hall, Gordon T. Brown y Alessandra Zambonelli. Timber Press, 2007.

TRUFICULTURA. FUNDAMENTOS Y TECNICAS. S. Reyna (coordinador). Ediciones Mundi-Prensa; Madrid, 2007.

TREES, TRUFFLES, AND BEASTS: HOW FORESTS FUNCTION. Chris Maser, Andrew W. Claridge y James M. Trappe. Rutgers University Press, 2008.

Domesticar la trufa

Aunque en los últimos decenios la ciencia ha hecho notables progresos en la ecología de las trufas, la truficultura apenas si ha cambiado desde los años sesenta, cuando se desarrolló en Francia una técnica de invernadero para añadir esporas de la trufa negra del Périgord a la mezcla de turba. Con ella se llenan las macetas destinadas a pimpollos de encina y avellano, que más tarde se plantarán en lugares apropiados para formar las plantaciones truferas. En condiciones ideales, las plantaciones truferas pueden producir una cosecha al cabo de cuatro a cinco años.

En los Estados Unidos, se establecieron las primeras plantaciones truferas en los años ochenta, tras muchos intentos fallidos. Hoy en día, el truficultor estadounidense más productivo es Tom Michaels, de Tennessee Truffles. Michaels, que fue alumno de doctorado de Trappe, obtuvo una cantidad impresionante de trufas del Périgord (100 kilogramos) en la temporada 2008-2009. Consigue esos resultados gracias a un especial cuidado del suelo, al que añade cal cada año para mantenerlo friable y bien drenado. También se ha logrado cultivar trufas del Périgord en Nueva Zelanda y Australia.

El éxito del cultivo de la trufa del Périgord contrasta con el fracaso del cultivo de la especie de trufa más apreciada y de mayor valor en el mercado (la trufa blanca italiana que Mirko y Clinto cazaban, con un aroma intenso especial). Por razones desconocidas, esa especie se resiste a crecer en invernadero. La secuenciación de su genoma, que está a punto de terminarse, podría proporcionarnos la clave que nos permitiera producir a voluntad la reina de las trufas.

Entretanto, puede que las trufas se vuelvan más abundantes incluso sin necesidad de cultivarlas: con el calentamiento del planeta, se extenderán los hábitats más cálidos y secos preferidos por las trufas, con lo que, previsiblemente, aumentará su producción y se acelerará su desarrollo. Así pues, el cambio climático puede conllevar alguna ventaja a pesar de todo: más trufas para el ser humano y los animales.

Nacimiento de una salamandra

Eduardo Obis

La naturaleza esconde secretos que suelen pasar desapercibidos incluso al más tenaz de los naturalistas. Uno de los que guarda para sorprendernos y fascinarnos es la estrategia reproductora de la salamandra común (*Salamandra salamandra*).

La mayoría de los anfibios se reproducen mediante la puesta de un número variable de huevos. Después de un tiempo, eclosionan y dan lugar a larvas que, más adelante, se metamorfosearán y se convertirán en adultos. Sin embargo, *S. salamandra* presenta dos estrategias reproductoras muy diferentes. Ambas responden a la adaptación que experimentó la especie durante el Pleistoceno, caracterizado por sucesivos períodos glaciales.

Las subespecies de la mayor parte de la península Ibérica son organismos ovovivíparos, como es el caso de *S. s. terrestris* (*en las imágenes*). Retienen en su interior los huevos, que maduran sin la amenaza de los depredadores. Las larvas se expulsan dentro de la envoltura del huevo, pero pronto se desprenden de ella. Son carnívoras: empiezan a alimentarse de pequeños animales acuáticos desde el primer momento. Después de unos cuatro meses, se metamorfosearán y, al cabo de dos a cuatro años, adquirirán la madurez sexual.

La población cántabra (*S. s. bernardezi*) y la que habita en el sudeste de los Pirineos (*S. s. fastuosa*) exhiben una estrategia bien distinta. Retienen las larvas en su interior hasta su completa metamorfosis y, por último, liberan ejemplares subadultos totalmente desarrollados: son organismos vivíparos (aunque en ningún momento la madre transfiere a las larvas sustancias nutritivas). En esas poblaciones aisladas, el viviparismo surgió quizá como consecuencia de la escasez de zonas húmedas donde liberar las larvas.



1. La península Ibérica cuenta con nueve subespecies de *S. salamandra*, de las cuales ocho son endémicas. En la foto, *S. s. terrestris*, presente en gran parte de Cataluña.



2. Las subespecies de salamandra ovovivíparas, como *S. s. terrestris*, expulsan las larvas ya desarrolladas, pero aún con la envoltura del huevo.

3. Después de unos pocos segundos, las larvas se desprenden totalmente de la envoltura.

4. Las larvas respiran mediante branquias; durante la metamorfosis, serán absorbidas y aparecerán en su lugar los pulmones.

FOTOGRAFÍAS DE EDUARDO OBIS

Las redes contra la pobreza

El uso apropiado de tecnologías de la información y la comunicación, unido a la colaboración de la ciudadanía, pueden salvar vidas

Jeffrey D. Sachs

En su magnífico nuevo libro *The Checklist Manifesto (Manifiesto por la lista de verificación)* (Metropolitan Books, 2009), el cirujano y escritor Atul Gawande explica cómo el éxito de una intervención quirúrgica depende de la compleja interacción entre cirujanos, enfermeros, anestesistas y otros especialistas. Para afrontar problemas de última hora, no sólo deben poseer capacidades altamente especializadas, sino también la habilidad de trabajar en equipo. Lo mismo podría aplicarse al piloto, copiloto y tripulación de un avión. La clave del éxito es contar con instrumentos especiales, entre ellos, las listas de verificación, los árboles de decisión y la inteligencia artificial.

La tecnología de la información proporciona soluciones muy innovadoras en situaciones complejas de grupo. Pero los logros más espectaculares se producen en circunstancias de extrema pobreza. Así es como la telefonía móvil y la banda ancha inalámbrica están acabando con el completo aislamiento de las poblaciones rurales. Esas técnicas permiten a los trabajadores —incluso aquellos con una formación muy elemental— una comunicación más eficaz y un uso de los sistemas expertos y la inteligencia artificial.

En un viaje reciente a Africa, fui testigo de dos ejemplos sencillos pero impactantes de protocolos que salvaron vidas gracias a los teléfonos móviles. En el pueblo ghanés de Bonsaaso, incluido en el Proyecto Aldeas del Milenio, un simple sistema basado en telefonía está reduciendo la mortalidad materna por parto. Un equipo de profesionales sanitarios locales con una preparación básica, además de una matrona, un conductor de ambulancia y un hospital receptor, se coordinan por medio de teléfonos móviles. Cada vez se asisten más partos en las clínicas que en los domicilios; en caso de complicaciones, la madre es trasladada a un hospital situado a unos quince kilómetros de distancia. La conexión de teléfono móvil entre las poblaciones, la clínica, la ambulancia y el hospital permite una coordinación hasta ahora impensable.

En el poblado keniata de Sauri, que también forma parte del Proyecto Aldeas del Milenio, los profesionales sanitarios locales son pioneros en la aplicación de sistemas expertos para el control de la malaria. Hasta hace poco, los pacientes tenían que desplazarse a pie o ser conducidos hasta un hospital, a menudo situado a varios kilómetros de distancia, para que un técnico capacitado analizara en el microscopio un frotis de sangre y, si se confirmaba la infección, extendiera la receta. Al escasear los centros sanitarios, y aún más los microscopios y los técnicos, los casos de paludismo sin tratar proliferaban sin cesar.

En el nuevo procedimiento, los profesionales sanitarios locales visitan a las familias para identificar las personas con fiebre que pudieran sufrir malaria. Realizan pruebas diagnósticas rápidas a partir de una gota de sangre y después envían con el móvil un mensaje con el DNI del paciente y los resultados del análisis. Segundos más tarde, una respuesta automática les indica el tratamiento apropiado, si lo hay. También se envían recordatorios sobre los tratamientos a seguir o las citas médicas del paciente. El nuevo sistema de control de la malaria incluye mosquiteras tratadas con insecticida, preparadas para que duren cinco años, y una nueva generación de medicamentos mixtos que contienen artemisinina, un compuesto vegetal utilizado en la medicina tradicional china.

Este conjunto de medidas constituye un sistema muy efectivo de control del paludismo. Un despliegue parcial del sistema ha reducido espectacularmente la prevalencia de la enfermedad en varias partes de Africa. Un modesto apoyo financiero internacional podría acelerar enormemente la aplicación del sistema completo y, si se ampliara a toda Africa, con unos 7 dólares por persona al año se podrían salvar cientos de miles de vidas en las zonas de transmisión de la malaria.

La sanidad pública en India está progresando de forma similar gracias a las tecnologías de información avanzadas, los profesionales sanitarios locales y las mejoras en los sistemas de gestión. En el pasado, los datos sobre la salud de la población procedían de encuestas realizadas cada tres años, y esos resultados se usaban principalmente para la investigación. A partir de ahora, la información clave estará disponible en sólo unas horas o días y se utilizará para administrar el sistema de salud en tiempo real.

Las listas de verificación, el trabajo en equipo y los sistemas avanzados de telecomunicación pueden mejorar la producción agrícola, el control de las enfermedades, las redes de negocios, la financiación rural y los sistemas educativos. Pronto los campesinos tendrán acceso a información local y podrán asesorarse sobre las necesidades específicas del suelo, el momento adecuado de la temporada de siembra, los pronósticos de sequía y lluvia, los precios del mercado y problemas logísticos. El banco y los servicios de pagos por teléfono móvil se introducirán incluso en las regiones más remotas. Si la ayuda al desarrollo se orienta hacia estos nuevos sistemas, la capacidad del mundo para reducir la pobreza, el hambre y las enfermedades —y la violencia que conllevan— será más poderosa y efectiva que nunca.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

El hidromiel

Esta bebida alcohólica, antiquísima y mitológica, se obtiene a partir de la fermentación, a temperatura controlada, de una mezcla de agua y miel

Pere Castells

La historia apunta al hidromiel como la primera bebida alcohólica fermentada consumida por los humanos. En la cueva de la Araña en Bicorp (Valencia), se descubrió una pintura de unos 7000 años de antigüedad en la que aparece representada una figura humana recolectando miel. Dado que la miel contiene levaduras, es de suponer que en algún momento el agua de la lluvia diluyera la miel, facilitara la fermentación y, con ello, la obtención del hidromiel. Esta bebida se cita ya en versos del Rig Vedá, uno de los libros sagrados del vedismo, datado entre 1700 y 1100 a.C.

El hidromiel era muy consumido por los griegos, que lo denominaban *melikraton*. También para los romanos era una bebida común. Se cita en multitud de relatos pertenecientes a la mitología germánica; en la popular ópera de Richard Wagner, *La valquiria* ("Die Walküre"), el hidromiel se considera una bebida reservada a los héroes y escogidos. Según la tradición teutona, para engendrar hijos varones debía consumirse hidromiel durante un ciclo lunar. Celtas, normandos, vikingos y otros pueblos lo consumían en abundancia. Le atribuían propiedades energéticas, digestivas y relajantes. También los mayas, en América, disolvían miel en agua con trozos de corteza de árbol y la hacían fermentar, para su consumo en fiestas.

Según Plinio, la primera receta para la fabricación del hidromiel se debe a Aristeo, rey de Arcadia. Columela menciona en su obra sobre los trabajos del campo *De re rustica* numerosas formulaciones del hidromiel empleadas por los romanos.

Conforme se extendían, desde el área mediterránea, las técnicas vinícolas, comenzó a decrecer el consumo del hidromiel. A la expansión del vino se añadió el protagonismo creciente de la cerveza y un descenso en la demanda de miel, debido a las importaciones de azúcar de las Indias Occidentales. Con el tiempo, el hidromiel fue relegado al consumo ocasional.

Pueden elaborarse distintos hidromieles: secos o dulces; claros u oscuros; de diferentes aromas y tonalidades, y con distinta graduación alcohólica. Resulta crítica la selección de las mieles; en función de su composición floral (que se determina mediante análisis fisicoquímicos), se define el proceso de elaboración. Se recomiendan mieles monoflorales y de gran calidad.

La desinfección del instrumental y la higiene en todas las etapas del proceso resultan fundamentales para la obtención de un buen producto. El primer paso consiste en añadir la miel al agua, previamente calentada. Deshacemos la miel en el agua y calentamos la mezcla para esterilizarla. Eliminamos de la superficie la espuma formada (contiene restos de cera y otras partículas); tras un enfriado rápido, transvasamos el líquido a los bidones. Añadiremos cierta cantidad de agua, que variará en función de la graduación alcohólica que queramos obtener. Añadiremos también las levaduras (*Saccharomyces*), polen y otros ingredientes complementarios, según el caso.

La fermentación se lleva a cabo a una temperatura controlada de entre 18 y 22 ºC. Al principio se produce abundante espuma, que luego va disminuyendo. Deben controlarse los azúcares, la densidad y la acidez. Este proceso dura entre un mes y medio y dos meses. Se realiza luego la clarificación. Se deja envejecer en toneles de roble a temperatura constante. También en esta fase se requieren controles periódicos. El grado alcohólico suele hallarse entre los 10 y 15 grados.

Predominan los reflejos de tipo ámbar con distintas tonalidades. Sus peculiaridades resinosas se deben en parte a las mieles utilizadas, así como al proceso de elaboración. Las propiedades organolépticas del hidromiel lo hacen especialmente recomendable para acompañar aperitivos, patés, postres y dulces.

Durante los últimos años se están llevando a cabo numerosos estudios científicos que se proponen revalorizar este producto. El grupo de María Gracia Molina, de la Universidad Nacional de Cuyo, ha caracterizado la fermentación alcohólica de la miel mediante parámetros fisicoquímicos de dilución en agua, levaduras y parámetros cinéticos. El hidromiel ya no se considera una bebida del pasado. Poco a poco va perdiendo su pátina mitológica para convertirse en un producto moderno.



CORTESIA DE AQUA MELIS

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

VIVIR EN UNA TIERRA NUEVA

La humanidad ha alterado profundamente el planeta, pero si adopta nuevas formas de pensar y actuar todavía puede evitar la autodestrucción

Ni el sistema bancario ni la industria de automoción: nuestro planeta es el único sistema "demasiado grande para permitir que entre en quiebra". El hombre lleva siglos expoliando los recursos de la Tierra y abrumándola con sus desechos, emigrando sin más a otro lugar cuando un manantial se seca, o un paraíso se contamina. Hemos llevado al límite ese proceder; no es posible continuar así. En la mente de científicos, sociólogos y gentes de todo el mundo está calando la idea de que la especie humana ha transformado el planeta natural en un planeta industrializado. Si queremos sobrevivir, resulta imperativo el retorno hacia unas condiciones más sostenibles.

¿Cuál es, pues, el plan de salvación? El primer paso consiste en determinar la proximidad de la Tierra al colapso. En "Límites de un planeta sano" (*en este mismo número*), el ecólogo Jonathan Foley presenta los resultados de un equipo internacional de investigadores que ha calculado unos límites de seguridad para diversos procesos ambientales fundamentales que debemos mantener bajo control. Tal es el caso del cambio climático y la acidificación de los mares, que podrían minar la sostenibilidad si se permite que avancen demasiado. Quizá las cifras calculadas deban afinarse más, pero conocer los procesos de máxima relevancia nos ayudará a encontrar soluciones. En "Soluciones para las amenazas ambientales", ocho expertos proponen remedios concretos.

Tales correcciones frenarían la degradación del medio, aunque seguramente no eliminarían la causa del problema. Según Bill McKibben, del Middlebury College, los errores cometidos se deben a la voracidad insaciable del crecimiento económico, auténtico motor de la sociedad moderna. En "Desterrar el hábito de crecer" se ofrece un extracto de un libro de McKibben, de reciente aparición, donde el autor sostiene que debemos renunciar al crecimiento y organizarnos sobre el principio de una sabia conservación de los recursos. Sus críticos afirman que tal idea no es realista; de ahí la entrevista, "¿De veras necesitamos un crecimiento cero?", realizada a McKibben.



JEN CHRISTIANSEN

Se han determinado los valores críticos de procesos ecológicos cruciales y relacionados con la habitabilidad de la Tierra. Mal presagio: Se han traspasado ya tres de ellos • **JONATHAN FOLEY**

LIMITES DE UN PLANETA SANO

Durante casi 10.000 años, desde el Holoceno y los albores de la civilización, nuestro mundo parecía increíblemente grande. Vastas extensiones de tierras y mares ofrecían recursos ilimitados. El hombre contaminaba con total libertad: sin más que emigrar a otro lugar, evitaba el impacto ambiental en sus asentamientos. Valiéndose de su capacidad para explotar las que tenía por riquezas inagotables, alzó imperios y sistemas económicos completos, sin comprender que tal privilegio tendría un fin.

Gracias a los avances en la sanidad pública, a la revolución industrial y, más tarde, a la revolución verde, la especie humana ha proliferado desde unos 1000 millones de individuos en el año 1800 hasta los casi 7000 millones de hoy en día. Sólo en los últimos 50 años, nuestro número se ha duplicado con holgura. La explotación de recursos, alimentada por la prosperidad económica de muchas sociedades, ha alcanzado también valores asombrosos: en 50 años, el consumo mundial de alimentos y agua dulce se ha más que triplicado; el de combustibles fósiles, se ha multiplicado por cuatro. En la actualidad, el hombre gasta entre la tercera parte y la mitad de toda la energía derivada de la fotosíntesis del planeta.

El crecimiento codicioso y desaforado ha generalizado, al mismo tiempo, la contaminación: un problema localizado se ha trocado así en una agresión a escala planetaria. La pérdida de ozono estratosférico y las concentraciones de gases de efecto invernadero constituyen complicaciones evidentes, pero son muchos otros los efectos nocivos de la acción antrópica.

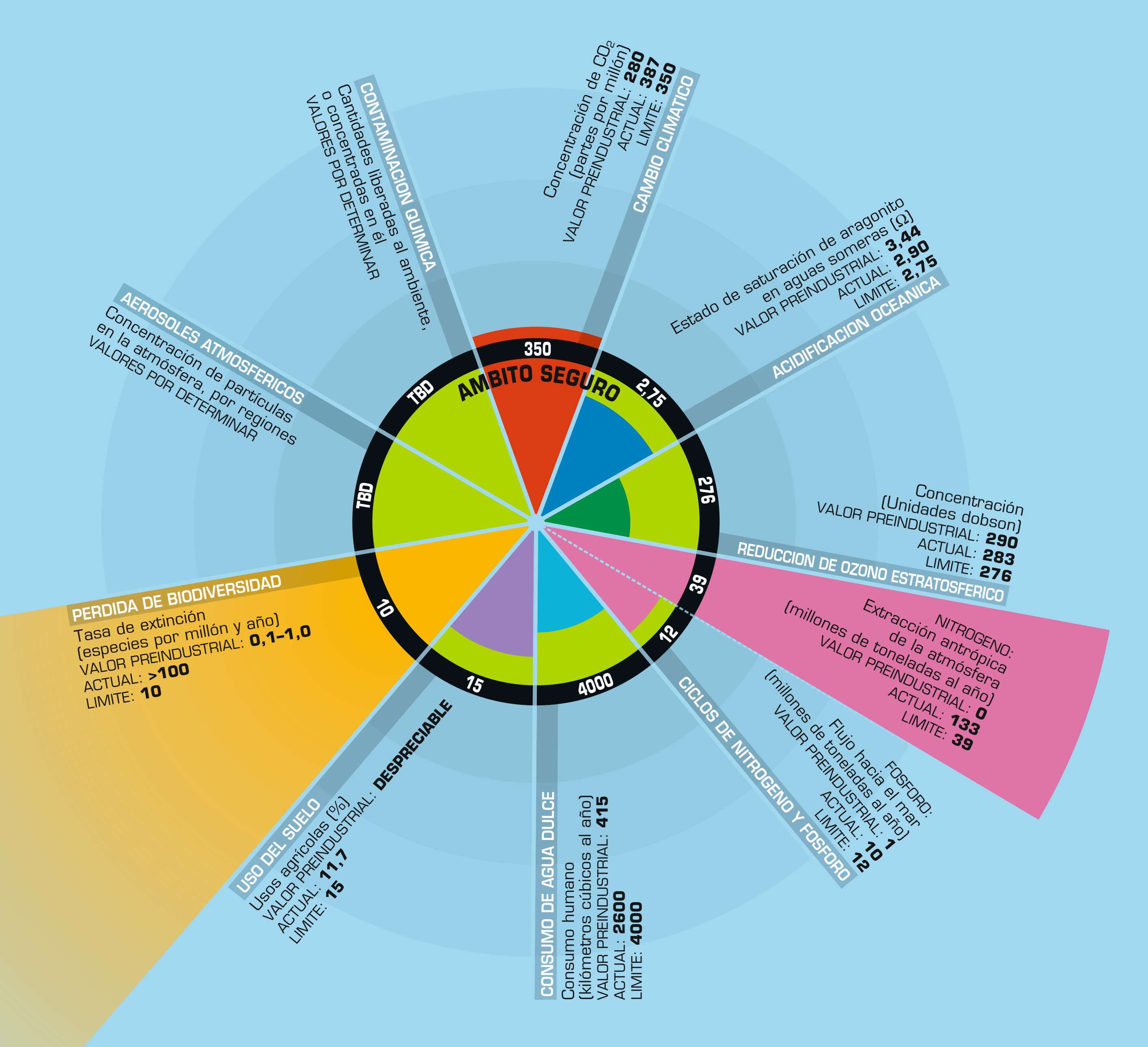
Hoy vivimos en un planeta "al límite", con una restricción de los recursos y de la capacidad de absorción de desechos. Las reglas para vivir en un mundo así son, por fuerza, muy distintas de las anteriores. Debemos dar máxima prioridad a las medidas que nos mantengan dentro del "ámbito seguro" de nuestros sistemas ambientales. De no ser así, vamos a provocar cambios muy graves cuyas consecuencias serán probablemente desastrosas para la humanidad.

¿Cómo evitar tales cambios? Un equipo de científicos europeos, australianos y estadounidenses (entre éstos, quien escribe) dirigido por Johan Rockström, del Centro de Resiliencia de Estocolmo, se propuso hace poco buscar respuestas a estas preguntas y planteó una cuestión más general: ¿Nos estamos acercando a "puntos de inflexión" planetaria, que llevarían a un ambiente mundial nuevo e inhóspito, ajeno a todo lo visto hasta ahora en el devenir humano?

Después de examinar numerosos estudios interdisciplinarios de sistemas físicos y biológicos, nuestro equipo identificó nueve procesos ambientales que podrían perturbar, e incluso impedir, la capacidad del planeta para albergar vida humana. El equipo estableció a continuación unos límites para esos procesos, dentro de los cuales la humanidad podría operar sin riesgo. Siete de los procesos poseen límites bien definidos (*véase la figura 1*), representados por una cifra concreta (con un cierto margen de incertidumbre, como es obvio): el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la contaminación por nitrógeno y fósforo, la reducción del ozono estratosférico, la acidificación de los océanos,

CONCEPTOS BASICOS

- Aunque se esté prestando mucha atención al cambio climático, la pérdida de especies y la contaminación por nitrógeno exceden con mucho los márgenes de seguridad. Otros procesos ambientales van camino de alcanzar límites peligrosos.
- Para hacer más sostenible la vida humana sobre la Tierra, es urgente utilizar fuentes energéticas que consuman poco carbono, atajar la deforestación y roturado de las tierras, y revolucionar las prácticas agrícolas.



JEN CHRISTIANSEN

1. LOS PRINCIPALES PROCESOS AMBIENTALES deben mantenerse por debajo de ciertos límites; de lo contrario, el ámbito seguro para la humanidad se verá amenazado. El sombreado indica hasta dónde ha avanzado un proceso desde los valores preindustriales hasta los valores umbrales, rebasados ya en tres casos: la biodiversidad, el flujo de nitrógeno y el cambio climático. (Los flujos de nitrógeno y fósforo se han emparejado, porque tienden a darse conjuntamente.)

el consumo de agua dulce y el uso del suelo. Los dos procesos restantes (la contaminación atmosférica por aerosoles y la contaminación química a nivel mundial) no se han estudiado aún en profundidad, por lo que no se han determinado todavía sus límites.

El análisis de nuestro grupo hace ver que tres de los procesos han rebasado ya sus límites: la pérdida de biodiversidad, la contaminación por nitrógeno y el cambio climático. Y todos los demás se están encaminando hacia sus valores umbrales. El conjunto citado resume, en una primera aproximación, las condiciones ambientales que entrañan mayores riesgos y proporcionan un marco conceptual para reflexionar sobre la forma de gestionarlos.

El problema de los combustibles fósiles

Entender las amenazas ambientales más apremiantes nos permite atisbar las posibles formas para hacerles frente. Dos de ellas (el cambio climático y la acidificación de los océanos) tienen una causa de sobra conocida: el consumo de combustibles fósiles y la liberación de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera.

Cambio climático. Nuestro planeta ha experimentado un calentamiento apreciable, que va en aumento, provocado por la acción humana. Los científicos y los líderes políticos están buscando formas de evitar sus consecuencias más devastadoras, entre ellas, la fusión del hielo en los casquetes polares, el agotamiento del agua dulce y la alteración de los sistemas climáticos regionales. La concentración media de CO_2 alcanza ya 387 ppm (partes por millón en volumen). En el actual debate sobre los valores de los gases que provocan alteraciones graves en el clima, se ha propuesto un intervalo de entre 350 y 550 ppm de CO_2. En nuestro análisis, planteamos una cifra conservadora de 350 ppm como un objetivo a largo plazo con el fin de mantener el planeta alejado del punto de inflexión climático. Para alcanzar ese objetivo, es preciso aplicar en todo el mundo medidas inmediatas para estabilizar las emisiones de

gases de efecto invernadero, y en decenios sucesivos, reducirlas a valores sustancialmente inferiores a los actuales.

Acidificación de los océanos. Representa el pariente menos conocido del cambio climático. Al elevarse la concentración atmosférica de CO_2 aumenta la cantidad disuelta en el agua en forma de ácido carbónico, que eleva la acidez de las aguas someras. Los mares son químicamente básicos, con un *p*H en torno a 8,2. Pero los datos obtenidos indican que ese *p*H ha disminuido hasta casi 8,0 y continúa en descenso. La métrica utilizada por nuestro grupo para cuantificar los daños asociados a ese cambio se basan en el aragonito, una forma de carbonato cálcico que se crea en la superficie marina. Muchos organismos que sustentan la cadena trófica marina, desde los corales hasta el fitoplancton, dependen del aragonito para formar su esqueleto o concha. El aumento de la acidez podría debilitar gravemente los ecosistemas marinos y sus redes tróficas. Razón de más para que los países modifiquen el rumbo hacia un futuro energético menos dependiente del carbono.

Secuelas de la producción de alimentos

Aunque la humanidad se ha apropiado ya del 35 por ciento de las tierras emergidas, que dedica a cultivos y pastos, la expansión de la agricultura constituye el principal motivo de la deforestación, con la consiguiente destrucción de ecosistemas naturales. Son varios los límites planetarios que corren peligro de ser traspasados debido al uso inadecuado del suelo.

El autor

Jonathan Foley es director del Instituto de Medio Ambiente de la Universidad de Minnesota. Se formó en física atmosférica. En la actualidad, su trabajo se centra en las relaciones existentes entre el uso del suelo, la agricultura y el medio a escala mundial.

FORZAR EL LIMITE

Si se consiente que los procesos ambientales rebasen ciertos límites, las consecuencias pueden ser graves. Para evitarlo, es necesario actuar y mantener esos procesos dentro de límites seguros [*véase también* "Soluciones para las amenazas ambientales", *en este mismo número*].

PROCESO AMBIENTAL	CONSECUENCIAS SI SE EXCEDE	POSIBLES SOLUCIONES
Pérdida de biodiversidad	Deterioro de ecosistemas terrestres y marinos	Frenar la deforestación y la ocupación del suelo; pagar por los servicios ecológicos
Ciclo del nitrógeno	Expansión de las zonas muertas en aguas dulces y marinas	Aplicar menos fertilizantes; procesar los purines; utilizar vehículos híbridos
Ciclo del fósforo	Perturbación de las cadenas tróficas marinas	Aplicar menos fertilizantes; procesar los purines; procesar mejor las basuras
Cambio climático	Fusión de los hielos polares y los glaciares; alteración de climas locales	Usar energías y combustibles de bajo contenido en carbono; fijar precio a las emisiones de carbono
Uso del suelo	Degradación de ecosistemas; fuga de dióxido de carbono	Limitar el crecimiento urbano; elevar la eficiencia agropecuaria; pagar por los servicios ecológicos
Acidificación del océano	Muerte de microorganismos y corales; menor retención de carbono	Usar energías y combustibles de bajo contenido en carbono; reducir el lavado de las sustancias fertilizantes
Consumo de agua dulce	Degradación de ecosistemas acuáticos; disminución del suministro de agua	Mejorar la eficiencia del riego; instalar sistemas de poco consumo hídrico
Destrucción del ozono estratosférico	Radiaciones lesivas para humanos, fauna y flora	Abandono total de los hidroclorofluorocarburos; comprobar los efectos de nuevos compuestos

Pérdida de biodiversidad. La explotación de las tierras está provocando una de las mayores extinciones de especies de la historia del planeta. La desaparición actual de especies es de 100 a 1000 veces más rápida que las tasas naturales medias observadas en el registro geológico. Este ritmo de destrucción afecta de igual manera a los ecosistemas terrestres y a los marinos, y podría socavar procesos ecológicos a escala regional y mundial. Deben alentarse los esfuerzos por conservar la biodiversidad, especialmente en las delicadas selvas tropicales. Iniciativas como la del programa de las Naciones Unidas "Reducción de las emisiones debidas a la deforestación y degradación de los bosques" (REDD), que promueve la financiación para frenar la destrucción de los bosques tropicales y aborda al mismo tiempo el declive de la biodiversidad y las emisiones de dióxido de carbono, podrían resultar de gran eficacia.

Contaminación por nitrógeno y fósforo. La generalizada aplicación de abonos artificiales ha alterado las características químicas del planeta. A causa de los fertilizantes, los flujos de nitrógeno y fósforo en el medio se han más que duplicado, a razón de unos 133 millones de toneladas de nitrógeno y 10 millones de toneladas de fósforo al año. Ambos flujos están provocando una contaminación hídrica generalizada, la degradación de muchos lagos y ríos, y el desequilibrio ecológico de los mares litorales, pues crean grandes zonas muertas, hipóxicas. Se necesitan nuevas prácticas agrícolas que favorezcan la producción de alimentos, al tiempo que protegen el medio.

Agotamiento del agua dulce. En la actualidad se están retirando del planeta unos 2600 kilómetros cúbicos anuales de agua dulce, procedentes de ríos, lagos y acuíferos. Se destinan al regadío (70 por ciento), usos industriales (20 por ciento) y consumo doméstico (10 por ciento). Como resultado de tal extracción, los grandes ríos han visto mermado su caudal y algunos se están secando por completo. Entre los ejemplos más ilustrativos, cabe citar el río Colorado, cuyas aguas ya no llegan al mar, y el mar de Aral, convertido casi en un desierto. La demanda futura de agua podría ser enorme. La eficacia en el uso del agua a nivel mundial debe mejorar mucho, sobre todo en los regadíos, para evitar pérdidas aún más graves.

A la máxima distancia

Los estudios de nuestro grupo, publicados en *Nature* en septiembre de 2009, generaron un intenso debate científico. En términos generales, nuestro trabajo fue bien recibido y

entendido como lo que es: un experimento conceptual que pretende definir unos límites planetarios que no conviene traspasar. No obstante, el intento de concretar tales límites ha sido duramente criticado por algunos científicos, mientras que otros disienten de los valores numéricos propuestos.

La objeción más importante quizá se deba a la definición de los valores umbrales: podría pensarse que estamos defendiendo la idea de que la destrucción ambiental es tolerable mientras se mantenga dentro de esos umbrales. Todo lo contrario: la sociedad no debería permitir que el mundo fuera a la deriva y nos acercáramos al colapso, para luego actuar. La aproximación al valor límite que representaría pasar de un tercio del total a dos tercios conllevaría enormes daños. Recomendamos mantener la máxima distancia posible a esos umbrales, porque cada uno de ellos entraña una crisis ambiental.

La mayoría de las críticas recibidas han sido razonables. Nuestro grupo acogió sin sorpresa muchas de ellas. Dábamos por descontado que el concepto mismo de los valores umbrales exigiría un análisis más profundo. En especial, las cifras calculadas debían ser más exactas, empeño en el que seguimos persistiendo. Aun así, consideramos que se trata de una idea muy poderosa que ayudará a crear una conciencia colectiva sobre los límites ambientales de la existencia humana.

Esbozos de soluciones

Al plantear los requisitos económicos, sociales y ambientales de un mundo sostenible, habría que respetarse en todo el planeta un amplio sistema de topes ecológicos. La sociedad ha empezado a abordar algunos de esos retos, pero de modo fragmentario, considerando por separado los distintos límites. En realidad, los límites se encuentran fuertemente vinculados entre sí. Al traspasar uno de ellos, se intensifica la presión sobre los demás y aumenta el riesgo de ruptura. Por ejemplo, si se superara el límite climático, podría elevarse aún más el ritmo de extinción de especies. De forma análoga, la contaminación por nitrógeno y fósforo puede mermar la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y acelerar en ellos la pérdida de biodiversidad. Es muy probable que los intentos por resolver cada problema por separado desemboquen en fracaso.

En estos momentos críticos no basta que los científicos nos limitemos a definir los problemas: hemos también de proponer soluciones. Para empezar, he aquí algunas ideas:

- Impulsar la transición a un sistema energético eficiente, poco dependiente del carbono. Los apremiantes problemas del cambio climático y la acidificación marina exigen que la concentración atmosférica de CO_2 se estabilice a la mayor brevedad, preferiblemente, por debajo de 350 ppm. Una transición semejante exigirá una mejora enorme de la eficiencia energética, seguida de un impulso inmediato de las fuentes energéticas poco dependientes del carbono.
- Reducir drásticamente la deforestación y la degradación del suelo, sobre todo en los bosques tropicales. Muchos de los límites planetarios, en particular los asociados a la biodiversidad, se encuentran en grave peligro por la implacable expansión de los asentamientos humanos.
- Invertir en prácticas agrícolas revolucionarias. La proximidad a algunos umbrales, entre ellos, los relativos a la contaminación hídrica y al consumo de agua dulce, depende de nuestros sistemas de agricultura industrializada. Hay varias vías de solución, como las nuevas variedades vegetales, las técnicas agrícolas de precisión y un uso más eficiente del agua y de los fertilizantes.

Conforme pongamos en práctica los posibles remedios, deberíamos admitir que no existe ningún recetario sencillo para lograr un futuro más sostenible. Con la experiencia desarrollaremos nuevos principios para aplicar a la economía, a la política y a la sociedad, pero deberemos tener presente lo limitado de nuestro conocimiento sobre los procesos humanos y ambientales. Gracias a los resultados cosechados y a las prácticas innovadoras, estaremos preparados para reaccionar ante los cambios ambientales y las necesidades sociales. Se reforzará así la resiliencia de los sistemas humanos y naturales, que se tornarán más robustos y menos vulnerables a las perturbaciones que muy probablemente van a suceder. Para conseguirlo, tendremos que hacer el máximo esfuerzo para vivir dentro de los límites de un planeta cuyos recursos se están agotando.



2. LAS FLORACIONES ALGALES (*volutas verdes en la parte inferior de la imagen*) en el mar Negro están provocadas por el lavado de sustancias empleadas en agricultura que son transportadas por el Danubio (*abajo*) y destruyen los ecosistemas acuáticos. Vemos aquí un ejemplo de la mutua relación entre procesos ambientales esenciales: el uso del suelo y la biodiversidad.

CORTESIA DE THE SEAWIFS PROJECT, NASA/CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD Y ORBIMAGE

Bibliografía complementaria

A SAFE OPERATING SPACE FOR HUMANITY. Johan Rockström et al. en *Nature*, vol. 461, págs. 472-475; 24 de septiembre, 2009.

COMMENTARIES: PLANETARY BOUNDARIES en *Nature Reports Climate Change*, vol. 3, págs. 112-119; octubre, 2009.

PLANETARY BOUNDARIES: EXPLORING THE SAFE OPERATING SPACE FOR HUMANITY. Johan Rockström et al. en *Ecology and Society*, vol. 14, n.º 2, artículo 32; 2009.

SOLUCIONES PARA LAS AMENAZ

La propuesta de algunos expertos para mantener bajo control

PERDIDA DE BIODIVERSIDAD

Gretchen C. Daily, *profesora de ciencias ambientales, Universidad Stanford*



PLUVISELVA, COSTA RICA

Los esfuerzos tradicionales de conservación de la biodiversidad, tomados por sí solos, están condenados al fracaso. Los espacios dedicados a reservas naturales son demasiado pequeños y escasos, y están sujetos a cambios constantes, por lo que apenas amparan una diminuta fracción de la biodiversidad terrestre. El reto consiste en lograr que la conservación sea atractiva, tanto desde una perspectiva cultural como económica. No podemos seguir tratando la naturaleza como si sus recursos fueran inagotables.

Dependemos de la naturaleza para proveernos de alimentos, agua potable, estabilidad climática, pesca, madera y otras prestaciones de carácter físico o biológico. Para conservar esos beneficios no bastan reservas naturales en lugares remotos: han de estar repartidas por doquier a modo de "estaciones de servicio del ecosistema".

Algunas iniciativas están integrando la conservación con el desarrollo humano. El gobierno de Costa Rica está subvencionando a propietarios de tierras por los servicios ecológicos que ofrecen las selvas tropicales, como la retención de carbono, la producción de energía hidroeléctrica, la conservación de la biodiversidad y el patrimonio paisajístico. China va a invertir 100.000 millones de dólares en "ecocompensación": mecanismos políticos y económicos innovadores que recompensen la conservación y la restauración del medio. Ese país está creando también "áreas de conservación de las funciones ecosistémicas" que constituyen el 18 por ciento de su superficie. Colombia y Sudáfrica han aplicado asimismo cambios notables en su política.

Tres factores contribuirían a que el resto del mundo adoptase ese tipo de modelos. El primero, la adquisición de nuevos conocimientos científicos e instrumentos para valorar y contabilizar el capital natural, expresado en términos biofísicos, económicos y otros. Por ejemplo, el Proyecto Capital Natural ha desarrollado el programa informático InVEST, que integra la valoración de los servicios ecológicos y sus compensaciones; gobiernos y corporaciones pueden utilizarlo para planificar el uso del suelo y de los recursos, así como el desarrollo de infraestructuras. El segundo, la demostración convincente de tales instrumentos en la gestión de los recursos. Y el tercero, la cooperación entre gobiernos, organizaciones de desarrollo, corporaciones y comunidades que ayuden a los países a construir economías más durables, al tiempo que mantienen los servicios ambientales esenciales.

CICLO DEL NITROGENO

Robert Howarth, *profesor de ecología y biología ambiental. Universidad Cornell*

La actividad humana ha alterado profundamente los flujos de nitrógeno en el planeta. La causa más importante es, con diferencia, la aplicación de abonos sintéticos. Pero en algunas regiones, como en el noreste de EE.UU., el factor determinante se halla en los combustibles fósiles. En ese caso, la solución estriba en conservar la energía y utilizarla con mayor eficiencia. Los vehículos híbridos suponen otro excelente remedio: sus emisiones de nitrógeno son bastante menores que las de los vehículos estándar porque sus motores permanecen apagados mientras el vehículo está detenido. (En los vehículos tradicionales, las emisiones aumentan cuando el motor funciona en punto muerto.) También se reducirían las emisiones de nitrógeno de las centrales térmicas de EE.UU. si se obligase a las centrales anteriores a la Ley de Aire Limpio y sus enmiendas a cumplir la normativa; esas centrales contaminan en exceso, con relación a la cantidad de electricidad que producen.

En la agricultura, la menor aplicación de abonos apenas disminuiría la cosecha. En particular, hay que evitar el lavado de fertilizantes de los campos de maíz, porque las raíces de esta planta penetran poco en el suelo y asimilan nutrientes sólo durante dos meses al año. Además, las pérdidas de nitrógeno podrían reducirse un 30 por ciento, o más, si durante el invierno se introdujeran cultivos de cobertura, como la avena o el trigo, que ayudaran al suelo a retener nitrógeno. Esos cultivos aumentarían también el secuestro de carbono en los suelos, mitigando así el cambio climático. Y todavía sería mejor plantar especies perennes, como las herbáceas, en lugar del maíz; las pérdidas de nitrógeno serían mucho menores.

La contaminación por nitrógeno debida a la alimentación de animales en estabulación intensiva constituye un problema enorme. Hace sólo treinta años, se alimentaba la mayor parte de los animales con forrajes locales, y sus purines y excrementos se utilizaban para abonar los campos. En la actualidad, la mayoría del ganado de EE.UU. recibe piensos y forrajes cultivados a cientos de kilómetros de distancia, lo que hace económicamente inviable devolver allí los desechos. ¿La solución? Exigir a las granjas de producción intensiva que procesen sus residuos, exactamente igual como hacen los municipios con los residuos humanos. Además, si consumiéramos menos carne, se generarían menos desechos y harían falta menos fertilizantes artificiales para cultivar los piensos de los animales. Lo ideal sería que la producción de carne procediera de explotaciones extensivas, donde los animales se nutrieran de hierbas perennes.

El crecimiento explosivo del uso del etanol como biocombustible está agravando la contaminación por nitrógeno. Varios estudios han confirmado que si los EE.UU. cumplieran los objetivos de producción de etanol, la cantidad de nitrógeno que llegaría al río Mississippi y alimentaría la zona muerta del golfo de México podría aumentar de un 30 a un 40 por ciento. La mejor opción sería prescindir de la producción de etanol a partir del maíz. Si EE.UU. desea pasarse a los biocombustibles, sería preferible cultivar herbáceas y árboles, y luego quemarlos para la cogeneración de calor y electricidad. La contaminación por compuestos nitrogenados y las emisiones de gases de efecto invernadero se reducirían de forma notable.

DOUG WECHSLER *Animals Animals/Earth Scenes*

AS AMBIENTALES

los procesos ambientales



CICLO DEL FOSFORO

David A. Vaccari, *director de ingeniería civil, ambiental y marina. Instituto Stevens de Tecnología*

Debido al aumento del nivel de vida, la demanda de fósforo está creciendo más deprisa que la población. Si continúa el ritmo actual, las reservas de fósforo más accesibles se agotarán antes de un siglo. Por consiguiente, nuestros dos objetivos deben ser la conservación del fósforo como recurso natural y la reducción de las pérdidas por el lavado de fertilizantes, que perjudica los ecosistemas costeros.

El flujo más sostenible de fósforo en el medio sería el natural: 7 millones de toneladas al año (Mt/año). Para alcanzar esa cifra y seguir atendiendo al consumo, que es de 22 Mt/año, tendríamos que reciclar o reutilizar el 72 por ciento de nuestro fósforo. Y si la demanda se elevase aún más, ese porcentaje debería aumentar en consecuencia.

Con la tecnología ya existente sería posible regular los flujos de fósforo. Las técnicas de conservación del suelo agrícola, como el cultivo sin arado y las terrazas, evitarían el vertido a los ríos de unas 7,2 Mt/año. La mayoría de los desechos de los animales de granja que no se reciclan —unos 5,5 Mt/año desembocan en el mar— podrían transportarse a regiones agrícolas y aprovecharse como abono. En el caso de los residuos humanos, las técnicas existentes permitirían recuperar entre el 50 y el 85 por ciento del fósforo, con el consiguiente rescate de 1,05 Mt/año.

Las actuaciones propuestas son factibles y se basan en la tecnología ya disponible. Y a cambio, se lograría rebajar la cantidad de fósforo vertida a las vías acuáticas de 22 Mt/año a 8,25 Mt/año, cifra no muy superior al flujo natural.

CAMBIO CLIMATICO

Adele C. Morris, *directora de política, Proyecto de economía energética y del clima. Institución Brookings*

Establecer la concentración atmosférica aceptable de los gases de efecto invernadero puede parecer una decisión científica, pero en realidad exige ponderar los beneficios y los costes inherentes a los diferentes objetivos, así como acordar quiénes van a asumir los gastos. Dada la dificultad de la labor, deberíamos adoptar estrategias que minimizasen los costes y mantuvieran un alto consenso durante años.

Las políticas climáticas basadas en precios permitirían abordar tales retos. En términos de política interior, una opción es imponer un gravamen razonable, pero creciente, sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Otra opción consistiría en un sistema de comercio de los derechos de emisión con fijación previa del límite máximo. Los precios de los derechos se establecerían entre ciertos márgenes y se irían incrementando con el tiempo. Un abanico de precios regulados mantendría el coste de las emisiones lo suficiente alto para incentivar la reducción de éstas, al tiempo que limitaría los riesgos económicos (y del propio programa de actuaciones) si los topes impuestos resultasen demasiado restrictivos.

Los compromisos internacionales, basados en precios, podrían constituir una solución alternativa cuando los topes de emisión resultasen demasiado estrictos e impracticables. Un tratado sobre el clima permitiría que los países se comprometieran a fijar impuestos a partir de un determinado nivel de emisiones. Tal flexibilidad podría paliar el temor de los países en desarrollo ante la posibilidad de que los topes de emisión pudieran frenar la mitigación de la pobreza.

USO DEL SUELO

Eric F. Lambin, *profesor de ciencias de la Tierra. Universidad Stanford y Universidad de Lovaina*

Para controlar el impacto ambiental del uso del suelo, deberíamos atender a la distribución mundial de los cultivos. La agricultura intensiva debería concentrarse en los mejores terrenos, los que pueden rendir cosechas óptimas. Pero una gran parte de esas tierras se está perdiendo. Nos estamos acercando a un punto en el que cualquier incremento de la producción de alimentos (por no hablar de los biocombustibles) provocará una rápida deforestación de los bosques tropicales y de otros ecosistemas. También conllevará la ocupación de tierras marginales, de rendimiento inferior.

Podemos evitar la pérdida de las mejores tierras mitigando la degradación del suelo, la extracción de agua dulce y la expansión urbana. Este paso exige una decidida zonificación y la adopción de prácticas agrícolas más eficientes, sobre todo en los países en desarrollo. También es posible atenuar la demanda de tierras agrícolas: basta reducir las mermas y desechos a lo largo de la cadena de distribución de alimentos, frenar el crecimiento demográfico, asegurar una repartición más equitativa de los alimentos en todo el mundo y reducir en gran medida el consumo de carne en los países más ricos.

Cabe salvaguardar más tierra para la naturaleza mediante políticas enérgicas de gestión del territorio, como ha hecho la Unión Europea. Unos cuantos países en desarrollo (China, Vietnam, Costa Rica) han logrado invertir el proceso de deforestación, merced a una mejor administración de los recursos ambientales, una vigorosa voluntad política de modernizar el uso del suelo, cambios culturales, normativas sobre el uso del suelo e incentivos para mantener los servicios ecológicos. El reto de esos países es la prosecución de tales políticas sin tener que importar más alimentos.



CULTIVOS Y URBANIZACION

JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); CORBIS (*fotografía*)

ACIDIFICACION DE LOS OCEANOS

Scott C. Doney, *científico sénior, Institución oceanográfica de Woods Hole*

Los mares están tornándose cada vez más ácidos debido a las emisiones de dióxido de carbono en todo el mundo; caben, no obstante, medidas paliativas de carácter mundial, regional y local. A nivel planetario, debemos frenar la emisión de CO_2 y, con el tiempo, rebajar su concentración hasta valores preindustriales. Las tácticas principales consisten en aumentar la eficiencia en la producción y consumo de energía, recurrir a energías renovables o nucleares, proteger los bosques y explorar técnicas de secuestro de carbono.

A escala regional, el lavado de los abonos no sólo crea zonas muertas en las aguas costeras, sino que contribuye a la acidificación. El exceso de nutrientes provoca la proliferación del fitoplancton que, al morir y descomponerse, libera a las aguas aún más CO_2. Es necesario utilizar los fertilizantes de modo más eficiente y procesar los purines y desechos del ganado. Otra medida consiste en minimizar las lluvias ácidas, provocadas en su mayoría por las plantas industriales y las centrales térmicas.

A escala local, la acidez de las aguas podría neutralizarse mediante el aporte de carbonato cálcico o bases químicas (producidas por medios electroquímicos a partir del agua marina y las rocas). Más práctico aún resultaría proteger determinadas poblaciones de moluscos y la acuicultura. Al parecer, las larvas de ostras y almejas sufren más la acidificación que los individuos adultos; la redistribución en el agua de las conchas de los lodos del fondo marino serviría para regular el *p*H y proporcionar un sustrato más adecuado para la fijación de las larvas.

Es de suponer que la disminución del *p*H marino se acelere en los próximos decenios. Los ecosistemas habrán de adaptarse al cambio. Podemos ayudar a conseguirlo reduciendo la contaminación de las aguas y la sobreexplotación pesquera; quizá los mares puedan soportar así cierta acidificación mientras abandonamos gradualmente los combustibles fósiles.

CONSUMO DE AGUA DULCE

Peter H. Gleick, *presidente. Instituto Pacific*


RIEGO POR GOTEO

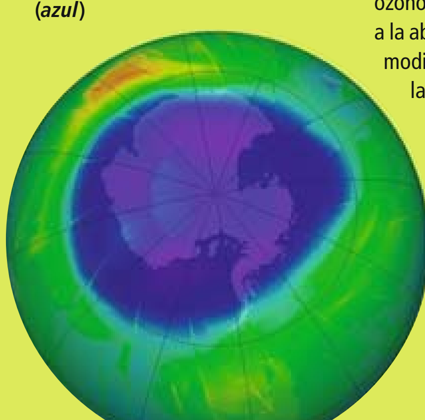
Pocos niegan la necesidad de poner límites al consumo de agua dulce. Mayor dificultad entraña la definición de tales límites, o las medidas a emprender para respetarlos.

Una manera de introducirlos es a través del concepto de "valor máximo de agua" (o "cenit del agua"), con sus tres variantes. El "valor máximo de agua renovable" corresponde al volumen total de aguas renovables en una cuenca. Muchos de los grandes ríos del mundo están a punto de alcanzar ese umbral, en el que la evaporación y el consumo sobrepasan la reposición natural por precipitaciones y otras fuentes. El "valor máximo de agua no renovable" se sobrepasa allí donde el consumo humano de agua excede con mucho las tasas naturales de recarga, como ocurre en los acuíferos fósiles de las Grandes Llanuras, Libia, India, China septentrional y en ciertas partes del Valle Central de California. En esas cuencas, el aumento inicial de extracción va seguido de una estabilización y posterior reducción, al elevarse los costes y el esfuerzo necesario para seguir beneficiándose del recurso (parecido a como sucede con el petróleo).

El "valor máximo de agua ecológica" alude a la idea de que en todo sistema hidrológico, el aumento de extracciones acaba por llegar a un punto en el que los posibles beneficios económicos de la extracción quedan anulados por la destrucción ecológica que provoca. Aunque resulta difícil cuantificar ese punto con exactitud, está claro que lo hemos rebasado en muchas cuencas de todo el mundo, donde se han producido enormes daños, entre ellas, el mar de Aral, los Everglades de Florida, el valle de Sacramento (San Joaquín) y muchas cuencas hidrográficas de China.

Afortunadamente, es posible ahorrar agua dulce sin perjudicar la salud humana ni la productividad económica. Por ejemplo, mejorando la eficiencia hídrica. Se puede aumentar la producción de alimentos con menos agua (y menos contaminación hídrica) si se cambia del regadío tradicional por inundación al goteo o la aspersión de precisión, junto con una supervisión y gestión más rigurosas de la humedad del suelo. Las centrales eléctricas tradicionales podrían pasar de la refrigeración por agua a la refrigeración en seco, y sería posible generar más energía mediante fuentes que apenas utilizan agua, como la fotovoltaica y la eólica. En los hogares, millones de aparatos domésticos ineficientes pueden reemplazarse por otros más modernos, en especial, máquinas de lavar, inodoros y duchas.

AGUJERO DE OZONO (*azul*)



REDUCCION DE OZONO

David. W. Fahey, *físico. Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de EE.UU. (NOAA)*

En 20 años, el protocolo de Montreal para proteger la capa de ozono ha reducido un 95 por ciento el uso de las sustancias causantes de la pérdida de ozono (sobre todo compuestos clorofluorocarbonados (CFC) y halones). A partir del 1 de enero del presente año, su producción ha cesado en los 195 países firmantes del protocolo. En consecuencia, el ozono estratosférico deberá restablecerse casi del todo hacia 2100. El protocolo prevé el uso de sustitutos temporales, en particular compuestos hidroclorofluorocarbonados (HCFC), y el desarrollo de otros compuestos que no provoquen daños, como los hidrofluorocarbonados (HFC).

El éxito de la iniciativa depende de varios factores:

- Continuar observando la capa de ozono para detectar con prontitud los cambios inesperados. Asegurarse de que los países siguen adhiriéndose a lo establecido (por ejemplo, la supresión de los HCFC hasta 2030).
- Mantener activo el grupo de evaluación científica previsto en el protocolo. El grupo identifica las causas de modificación de la capa de ozono y valora el riesgo potencial de las nuevas sustancias.
- Mantener el grupo de asesoría técnica y económica. Su función es proporcionar información sobre tecnología y compuestos de reemplazo que ayude a los países a satisfacer las demandas de refrigeración, acondicionamiento de aire y aislamientos espumosos sin dañar la capa de ozono.

Ambos equipos tendrán que evaluar conjuntamente el cambio climático y la recuperación de ozono. El cambio climático afecta a la abundancia de ozono porque modifica la composición química y la dinámica de la estratosfera. Además, los compuestos como los HCF y los HCFC son gases de efecto invernadero, y la gran demanda prevista de HFC podría tener consecuencias importantes para el clima.

EL FIN DEL CRECIMIENTO

La única solución para proteger el futuro de nuestra sociedad es pasar del crecimiento sin límites a la gestión inteligente de la riqueza y los recursos

BILL McKIBBEN

Los científicos proponen medidas tendentes a mitigar determinados daños ambientales y a desacelerar el consumo de ciertos recursos [*véase* "Soluciones para las amenazas ambientales", *en este mismo número*]. Pero Bill McKibben, del Colegio Middlebury y cofundador de la compañía internacional 350.org para mitigar el cambio climático, sostiene que para frenar la ruina del planeta, la sociedad debe desterrar su hábito más letal: el crecimiento a ultranza.

En su nueva obra, *Eaarth: Making a Life on a Tough New Planet* ("Vivir en un planeta nuevo, más riguroso: la Tierrra"), McKibben argumenta que la humanidad, arrastrada por su modo de vivir, ya está habitando un mundo esencialmente diferente. Para distinguirlo, lo denomina *Tierrra* (*Eaarth*). Este planeta no puede seguir aguantando el modelo de crecimiento económico que rige desde hace 200 años. Sólo evitaremos nuestra propia destrucción si logramos mantener los bienes y los recursos, en gran parte mediante el cambio a economías localizadas, más duraderas.

En los textos siguientes, extraídos de diferentes partes del libro, McKibben expone sus tesis. En los recuadros, tomados asimismo de su obra, el autor ofrece ejemplos de explotaciones agrícolas y de producción de energía en el ámbito local que han dado excelentes resultados.

Los nuevos planetas requieren nuevas costumbres. Así como es imposible respirar en Marte fuera de la base climatizada, tampoco se puede vivir en la Tierra de hoy como si estuviéramos en la de ayer: esa opción ha quedado descartada.

Nuestro mundo se ha regido por un arraigado hábito de crecimiento, tanto en el terreno económico como en el político. Desde los tiempos de Adam Smith, 250 años atrás, hemos supuesto que "más" equivale a "mejor" y que cualquier problema se resuelve a través de la expansión. Los resultados lo han demostrado,

GEORGE RETSECK (*libro de fondo*)

Podemos forjar hábitos duraderos, armoniosos, para habitar en este nuevo planeta, pero antes hay que abandonar la idea de que el futuro se va a parecer al pasado.

al menos durante bastante tiempo: el relativo bienestar de nuestra sociedad occidental es el fruto de diez generaciones de continuo crecimiento económico. Ahora, en cambio, nos encontramos atascados entre una etapa ya agotada y un porvenir complicado; es hora de que reflexionemos con especial atención sobre el futuro. En nuestro nuevo planeta, quizá tengamos que desterrar la universal manía del crecimiento.

* * *

Comprendo bien que este momento es el menos oportuno para plantear el tema. La transitoria detención del crecimiento que denominamos recesión —en una economía enfocada a la expansión— ha castigado numerosas vidas. Estamos hundidos en la deuda, tanto a escala individual como nacional. Y, al esforzarnos por remontar esta cuesta económica, apostamos aún más dinero del que podemos con la esperanza de volver a crecer una vez más. Es el llamado "estímulo económico": apostar por una reanudación del crecimiento que nos permita recuperar no sólo la cantidad invertida, sino la deuda que fuera el origen de nuestros apuros.

Mucho peor, por supuesto, es la deuda ecológica que afrontamos: el carbono que se acumula en la atmósfera y altera la morfología del planeta. Y, también ahí, la salida más inmediata ha sido impulsar un nuevo crecimiento, una expansión de la actividad económica dirigida a sustituir nuestro sistema de combustibles fósiles por algún otro que nos permita vivir con el mismo nivel que ahora —¡o incluso mejor!—, pero sin emisiones de carbono. Nos aferramos a la idea de un crecimiento verde como vía de escape de todos nuestros problemas.

Debo decir que presto mi apoyo a un proyecto de Manhattan verde, a un New Deal ("nuevo pacto") ecológico, a una misión Apolo no contaminante. Si tuviera dinero se lo habría dado a Al Gore para invertirlo en nuevas empresas de este género. Esas son las respuestas claras y legítimas de la gente responsable ante la crisis más peligrosa jamás encontrada, y en realidad están dando fruto. Es imprescindible haber recortado en un 30 por ciento nuestras emisiones de carbono en 2020, que dentro de diez años toda la energía eléctrica consumida proceda de fuentes renovables o alcanzar todas las demás metas señaladas por los expertos. Nuestro sistema debería responder precisamente con este tipo de acciones. Pero los cambios no van a producirse con rapidez suficiente para proteger el planeta en que habitamos. No creo que el paradigma del crecimiento pueda cubrir tales expectativas; el sistema ya no da más de sí.

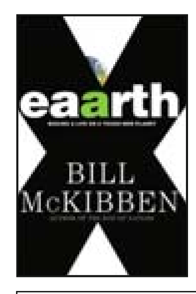
* * *

El panorama parece desalentador. Pero ciertamente podemos forjar hábitos duraderos, incluso armoniosos, para habitar en este nuevo planeta. Ante todo, debemos comprender nuestra posición actual. Tenemos que sofocar la intuición de que el futuro se va a parecer al pasado y el inveterado optimismo que nos dibuja un porvenir cada vez más llevadero. El planeta *Tierrra* se presenta cuesta arriba.

Creo que los estadounidenses lo hemos sentido en nuestra propia carne, incluso antes de que nos atrapara la recesión de Bush. El momento crítico quizás haya sido el principio de 2008, seis meses antes de que los grandes bancos comenzaran a derrumbarse; entonces la economía todavía parecía en auge, pero el precio de la gasolina se disparó hasta 4 dólares el galón.

Si en EE.UU. hay alguna idea arraigada, es la del movimiento. Hemos llegado acá desde lejanas costas, hemos atravesado el continente, construido autopistas e inventado el navegador GPS que opera en el salpicadero de nuestro coche. El progreso era constante. Y de repente, por primera vez, el avance se hizo irregular. Comenzó a frenarse. Un mes tras otro disminuían los kilómetros que se recorrían en coche, era difícil vender la antigua vivienda y, desde luego, imposible vender de segunda mano nuestro todoterreno.

Empezó a notarse un fenómeno extraño. A medida que subía el precio del petróleo, los envíos a larga distancia se hacían menos atractivos. En mayo de 2009, despachar un contenedor desde Shanghai a EE.UU. costaba 8000 dólares, que a principios de la década habían sido 3000 dólares. Las cargas transportadas iniciaron un declive (Ikea abrió una planta en Virginia, no en China). Un estratega monetario de Morgan Stanley afirma que ya se han cosechado los frutos más inmediatos de la globalización. Jeff Rubin, analista de CIBC World Markets en Toronto, ha sido más claro: "La globalización es reversible". Por supuesto, las acererías del Medio Oeste señalaron un crecimiento de la demanda



El autor

Bill McKibben, docente del Colegio Middlebury, es cofundador de la iniciativa internacional 350.org para la mitigación del cambio climático y miembro del Instituto Poscarbono. Fue redactor del *New Yorker* y ha escrito varias obras sobre medio ambiente; la última, *Eaarth: Making a Life on a Tough New Planet*, publicada en abril de 2010.

Soluciones para la alimentación local

En el último cuarto de siglo, la cantidad de cereal por persona ha ido en descenso, pese a la rápida difusión de la agricultura industrial a gran escala, los pesticidas y los cultivos transgénicos. Hay personas que empiezan a considerar la vuelta a una agricultura a pequeña escala, a producir gran cantidad de alimentos en granjas relativamente pequeñas sin recurrir apenas a los fertilizantes sintéticos o a los productos artificiales.

La nueva agricultura suele tener un óptimo rendimiento cuando combina los conocimientos actuales con la antigua sabiduría. En Bangladesh hay una nueva cooperativa aviar que, además de huevos y carne, produce residuos para alimentar un estanque de peces; de ahí se obtienen miles de kilogramos de proteínas al año y una abundante cosecha de jacintos de agua de los que se nutre un pequeño rebaño de vacas, cuyo estiércol finalmente se quema en un sistema de cocina por biogás.

Unos minúsculos estanques donde se reciclan los desechos de una granja, en Malawi, producen un promedio anual de 1500 kilogramos de pescado. En Madagascar, los arroceros que trabajan con expertos europeos han ideado maneras de incrementar las cosechas. Los plantones se transplantan unas semanas antes de lo habitual, más separados entre sí, y se dejan sin inundar los arrozales durante la mayor parte de la estación de crecimiento. Aunque se ven obligados a escardar más, logran un rendimiento de cuatro a seis veces superior. Se estima que el sistema ha sido adoptado por unos 20.000 agricultores.

En Craftsbury, en el estado de Vermont, Pete Johnson ha sido precursor de un sistema de cultivo permanente. Ha ideado y construido invernaderos solares que se desplazan sobre carriles. De este modo, puede cubrir y descubrir diferentes campos y cultivar verduras diez meses al año sin necesidad de combustibles fósiles; ello le permite una explotación agrícola continua con el apoyo de su comunidad.

No defiendo los alimentos locales porque sean más sabrosos ni más saludables. Sostengo que no hay otra solución. En un mundo más propenso a sequías e inundaciones, necesitamos la flexibilidad que ofrecen una treintena de cultivos diferentes en un mismo campo, no un vasto océano de maíz y soja. Ante la fácil propagación de las plagas por el aumento de las temperaturas, necesitamos disponer de multitud de variedades y especies locales. Y cuando el petróleo escasea, hacen falta granjas de este tipo, pequeñas y mixtas, que puedan abastecerse de sus propios abonos y acondicionar su propio suelo.

EL INVERNADERO PORTATIL de la granja de Craftsbury permite cultivar verduras diez meses al año en el frío estado de Vermont.



NANCY BARON *Invernaderos de Pete en la granja de Craftsbury*

que, según Rubin, responde a un incremento de costes de transporte: primero para importar hierro de China y luego para exportar productos de acero. De este modo llegan a anularse las ventajas en costes salariales y el acero producido en China ya no puede competir en el mercado estadounidense. Al elevarse el precio del crudo, aumentó la demanda de etanol, así como el coste de los alimentos: las naciones cayeron pronto en la cuenta de que el libre comercio no era la maravillosa herramienta que se preconizaba.

Puede que, al igual que hemos asistido al cenit del petróleo, hayamos también visto culminar el crecimiento económico. En otras palabras, no podremos conseguir que el sistema crezca más. Ascienden los costes de los seguros, se dispara el precio del petróleo, la economía se estanca, el dinero para investigaciones en nuevas energías se evapora y, cuando la economía se acelera de nuevo, el precio del crudo vuelve a subir. En mayo de 2009, un estudio de McKinsey & Company afirmaba que una nueva crisis del petróleo era "inevitable". Es como lavar y enjuagar, una y otra vez. Salvo que, por su baratura, los países empiezan a quemar más carbón. Así, pues, vuelta a enjuagar, lavar y luego quedarse con la cabeza llena de espuma porque las altas temperaturas han evaporado el contenido del depósito.

* * *

¿Quién pudo imaginar que el crecimiento llegaría a un fin? Para contestar, retrocedamos a los tiempos en que Lyndon B. Johnson era presidente de EE.UU., Martin Luther King fue asesinado y se estrenó *Hair* en Broadway. Un pequeño grupo de empresarios y científicos se

Soluciones energéticas locales

Debería estar claro que nuestra dependencia de los combustibles fósiles es demasiado grande. En unos pocos años vamos a tener que cambiar a otras fuentes de energía. En un mundo caótico, las fuentes locales y dispersas funcionan mejor que las centralizadas.

El objetivo prioritario en casi todos los planes es la conservación. La consultora McKinsey & Company estimaba en 2008 que las técnicas disponibles podrían recortar en un 20 por ciento la demanda mundial de energía prevista para 2020. En términos económicos, destaca la conveniencia de generar energía cerca del hogar: la mayoría de las poblaciones se gastan en combustible el 10 por ciento de sus fondos, que se transfieren casi por completo a Arabia Saudí o a Exxon. Pero en 2008, el Instituto para la Autonomía Local demostró que la mitad de los estados de EE.UU. podría cubrir sus necesidades energéticas dentro de sus fronteras, "y la mayoría de ellos podría hacerlo en una elevada proporción". Por ejemplo, el 81 por ciento de la energía que consume Nueva York y casi una tercera parte de la que necesita Ohio podría obtenerse de generadores eólicos y placas solares sobre edificios.

La energía local no es una idea romántica. En 2009, T. Boone Pickens abandonó el proyecto de un gigantesco parque eólico en el saliente noroeste de Texas (Panhandle) ante el excesivo coste de las líneas de transmisión y lo sustituyó por una serie de instalaciones más pequeñas, próximas a las grandes ciudades. Y en la costa oriental de EE.UU. se encuentran en marcha proyectos de parques eólicos marinos. Este tipo de "generación distribuida" produce energía en el lugar donde se necesita, sin tener que traerla desde grandes distancias. Aumenta el número de empresas que instalan "microplantas" para suministrar energía a un edificio o un campus; en 2008, ya contribuían a un tercio de todas las plantas de nueva generación de EE.UU. En Rizhao, una zona metropolitana de China de tres millones de habitantes, unos pocos empresarios locales empezaron a instalar en los años noventa calefactores solares sobre los tejados de todas las viviendas. Prácticamente todas las edificaciones urbanas ya se calientan por energía solar.

Al igual que con los alimentos, se avanzaría con mayor prontitud si el gobierno cesara de subvencionar la industria de los combustibles fósiles y, en cambio, promoviera normas como las de establecer tarifas de contribución, que obligasen a los servicios públicos a comprar a los residentes locales energía a precios decentes. Así se hizo en Alemania, que presume ahora de sus 1,3 millones de paneles fotovoltaicos, más que cualquier otro país del mundo.



CALENTADORES SOLARES instalados en miles de tejados en Rizhao, China, que reducen la demanda de electricidad para calentar el agua doméstica.

FEATURE CHINA/BARCROFT MEDIA

reunió entonces en la capital de Italia. Este grupo, el Club de Roma, propuso examinar las tendencias mundiales interrelacionadas y encargó la confección de un informe a un equipo de jóvenes analistas de sistemas del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

En 1972, cuando el equipo había terminado el informe y presentado el libro "Los límites del crecimiento", ya se había celebrado el primer Día de la Tierra y Richard Nixon había creado la Agencia de Protección Ambiental. Pero pocos eventos de la historia del medio ambiente tuvieron mayor eco que la publicación de ese librillo, traducido a 30 idiomas y vendido en 30 millones de ejemplares. Tres fueron las conclusiones del equipo de investigadores:

"1. Si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación ambiental, producción de alimentos y agotamiento de los recursos, nuestro planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años.

"2. Es posible modificar estas tendencias de crecimiento y establecer unas condiciones de estabilidad ecológica y económica que perduren en el futuro. El estado de equilibrio

mundial podría concebirse de tal manera que se satisficieran las necesidades materiales básicas de todo el mundo y cada persona tuviera la misma oportunidad de desarrollar su potencial humano.

”3. Si los habitantes del mundo deciden esforzarse por alcanzar este segundo objetivo, y no el primero, cuanto antes comiencen a trabajar por su logro mayores serán sus probabilidades de éxito.”

Mirando hacia atrás, resulta asombroso lo cerca que estuvimos de escuchar ese mensaje. Por todo el mundo se estudiaban maneras de frenar el aumento de la población. Los mejores resultados se obtuvieron con la instrucción femenina: en un corto plazo, las madres pasaron de alumbrar más de seis a menos de tres niños por término medio. Estábamos prestando atención a las primeras crisis del crudo, los primeros vertidos de grandes buques petroleros, las primeras normas de ahorro de combustible en automóviles. Eran los años en que el límite de velocidad en EE.UU. se fijó en 55 millas (menos de 90 kilómetros) por hora, cuando la movilidad se redujo en aras a la conservación ambiental. A finales de los años setenta, había más estadounidenses en contra que a favor del crecimiento económico continuo, algo que ahora nos parece imposible. En realidad, pasábamos por un breve período de apertura que nos hubiera permitido cambiar de orientación, alejarnos de los escollos.

Y, desde luego, no lo aprovechamos.

El Club de Roma no se equivocaba, como luego quedó de manifiesto. Simplemente se había anticipado. Se pueden ignorar durante largo tiempo los problemas ambientales, pero una vez que nos tocan, pueden terminar por ahogarnos. Si crecemos demasiado deprisa, agotaremos el petróleo y el hielo del Artico se fundirá.

He recargado adrede las tintas sobre el particular. Me mueve a ello la polarización de todos los sectores sociales en favor del crecimiento. Pero, honestamente, no es posible seguir creciendo. Hay demasiada concurrencia. El planeta se nos ha puesto cuesta arriba.

* * *

Queda, no obstante, otra posibilidad. Igual que haría un caminante extraviado en la selva, tenemos que detenernos, sentarnos, ver si llevamos en los bolsillos algo que nos pueda ayudar y empezar a discurrir sobre los pasos siguientes.

Primer objetivo: tenemos que madurar. Hemos pasado 200 años enganchados al carro del crecimiento, y ello nos ha deparado prosperidad y sinsabores. Pero su fuerte arraigo en nuestro interior nos ha mantenido en una perpetua adolescencia. Los políticos han proclamado que “vendrán tiempos mejores”. Pero eso no es verdad, en el sentido que solemos entender como “mejores”. En un planeta limitado, antes o después tenía que suceder. Y aún tuvimos la suerte de que los músicos dejaran de tocar mientras estábamos en la pista. Si 2008 ha resultado ser el año en que se detuvo el crecimiento —como también podría ser 2011, 2014 o 2024—, pues sanseacabó. Tenemos que verlo con claridad: no caben ilusiones, fantasías ni melodramas.

Objetivo número dos: necesitamos saber qué lastre debemos arrojar por la borda. Sin duda, los numerosos hábitos que caracterizan una sociedad de consumo. Pero el principal elemento a considerar se destaca cada vez más. La complejidad es el distintivo de nuestra época: se sustenta en la baratura de los combustibles fósiles y en la estabilidad del clima, factores ambos que han propiciado enormes excedentes de alimentos. La complejidad es nuestra gloria, pero también nos hace vulnerables. En 2008, cuando culminaron los precios del crudo y se hundieron los créditos, se empezó a notar que las relaciones internas son tan rígidas que un pequeño fallo en cualquier punto puede sacudir el sistema entero. Si la obtusa decisión de EE.UU. de destinar una parte de la cosecha de maíz a la producción de etanol desencadena revueltas alimentarias en 37 países, o una serie de inversiones miopes en hipotecas de Nevada provoca el cierre de miles de fábricas en China, es que hemos establecido demasiados vínculos entre los sistemas. Nuestros malos hábitos de conducción podrían incluso afectar a la fusión del casquete de hielo ártico.

Hemos transformado nuestro amable planeta: vivimos ahora en la *Tierrra*, que ya no es tan agradable. Estamos pasando velozmente de un mundo en el que presionamos sobre la naturaleza a otro mundo donde es la naturaleza la que nos hace retroceder, y con un ímpetu mucho mayor. Pero todavía tenemos que vivir aquí, así que convendrá decidir de qué manera.

La complejidad nos hace vulnerables; el cierre de miles de fábricas en China por unas inversiones hipotecarias miopes en Nevada refleja la excesiva vinculación entre nuestros sistemas.

Bibliografía complementaria

LIMITS TO GROWTH: THE 30-YEAR UPDATE. Donella H. Meadows et al. Chelsea Green, 2004.

LA ECONOMIA EN UN MUNDO REPLETO. Herman E. Daly en *Investigación y Ciencia*, págs. 58-65; noviembre, 2005.

ENTREVISTA A BILL McKIBBEN:
¿DE VERAS NECESITAMOS UN CRECIMIENTO CERO?

La sociedad siempre se había sostenido en el ámbito local, hasta que la revolución industrial iniciara una marcha inexorable hacia las economías centralizadas. En su obra *Eaarth: Making a Life on a Tough New Planet* ("Vivir en un planeta nuevo, más riguroso: la Tierrra"), Bill McKibben afirma que el incesante crecimiento está arruinando el planeta. El nuevo motor de la sociedad debe ser el mantenimiento de los bienes y recursos, en lugar de la expansión; de lo contrario, pereceremos. El redactor Mark Fischetti cuestiona sus postulados.

Su mensaje fundamental es que la humanidad debe abandonar el crecimiento como pauta de actuación. ¿No es posible conseguir un crecimiento más inteligente?

Ciertamente podemos —y debemos— hacer mejor las cosas. Pero ello no basta. Estamos alcanzando los límites de crecimiento que se nos vienen señalando desde los años setenta, y presenciamos cambios ambientales que nos desorientan. Sólo unos pocos lo han comprendido.

¿Es absolutamente necesario el crecimiento cero o sería sostenible un crecimiento "muy reducido"?

No creo en utopías, ni presento esquema alguno en el que el mundo pueda apoyarse. El análisis no consiste en dar una cifra determinada. Me interesan más las trayectorias: ¿qué sucedería si nos desviáramos de la idea del crecimiento como panacea y anduviéramos en otra dirección? Nos hemos concentrado tanto en fomentar el crecimiento que apenas hemos intentado otros caminos. Pero hay otras formas de evaluar la sociedad. Algunos países miden el grado de satisfacción. Si midiéramos el mundo con otros parámetros, la acumulación de riqueza individual perdería importancia.

Se desprende de ahí que son los sistemas grandes, centralizados y monolíticos los que gobiernan el crecimiento en agricultura, energía y otros sectores comerciales. ¿Está diciendo que lo grande es malo?

Hemos construido productos de grandes dimensiones porque permitían crecer con mayor rapidez. El tamaño potenciaba la eficacia. Pero eso ya no nos sirve. No necesitamos un caballo de carreras criado para correr a la velocidad máxima, pero con tobillos frágiles que se rompen a la menor irregularidad de la pista. Necesitamos un caballo de labranza resistente. Nuestra idea rectora debe ser la durabilidad, en lugar de la expansión.

¿El problema radica en la magnitud o en la complejidad que ésta entraña? Usted afirma que no sólo los bancos, sino otras industrias más fundamentales, son "demasiado grandes para permitir su quiebra", porque nuestra dependencia de ellas es muy alta. ¿Deberían desmantelarse o simplificarse de algún modo esas instituciones?

El sistema financiero, la producción energética y la explotación agrícola comparten muchos rasgos semejantes: en ellos intervienen un número reducido de agentes, estrechamente relacionados entre sí. En cada caso, cualquier anomalía provoca una cascada de efectos. Un alimento contaminado puede propagar el botulismo a los 48 estados de la Unión. En cambio, si las placas solares que abastecen mi casa fallan, yo tendré un problema, pero no caerá la red de suministro eléctrico en el este de los Estados Unidos.

Usted defiende, pues, un regreso a la autonomía local. Desde que E. F. Schumacher publicara en 1973 su obra *Small is Beautiful* ("Lo pequeño es hermoso"), entusiastas de todo el mundo han intentado implantar sistemas locales de alimentación y energía, aunque en numerosas regiones aún no lo han logrado. ¿Qué tamaño expresa el término "local"?

Encontraremos la dimensión justa. Podría ser una ciudad, una región, una provincia o un estado. Pero para encontrar la respuesta, debemos eliminar del sistema la enorme distorsión de las subvenciones, ya que envían todo tipo de señales erróneas sobre lo que deberíamos hacer. En el campo energético, hemos financiado durante tiempo los combustibles fósiles; en el agrícola, las ayudas han sido aún más notorias. En cuanto se agoten las subvenciones, podremos determinar cuál es la escala industrial razonable.

¿No son más caros los productos locales?

Tendríamos entonces mayor número de explotaciones agropecuarias, que podrían concentrar

JEN CHRISTIANSEN

más mano de obra; de este modo, se crearían más puestos de trabajo y el agricultor recogería una mayor parte de la renta. Desde un punto de vista económico, las explotaciones locales suprimen multitud de intermediarios: resulta mucho más barato alimentarse de verduras de los cultivos sostenidos por la comunidad. La carne podría encarecerse pero, francamente, el mundo no se acaba porque comamos menos carne. La mejor noticia que recojo en mi obra es que, en unos pocos años, se han difundido por todo el mundo en desarrollo técnicas agronómicas inteligentes, de ámbito reducido pero de acreditado valor.

Parece que la clave, para la agricultura local al menos, consiste en enseñar cómo se puede obtener mayor producción sin añadir más fertilizante.

Cierto. Y depende del lugar donde nos encontremos. No se trata de un sistema único que deba extenderse por todo el mundo, como ha sucedido con la agricultura industrial, basada en abonos sintéticos. Hay soluciones mucho más inteligentes. En vez de utilizar compuestos artificiales, causantes de problemas de toda índole, estamos estudiando métodos alternativos y el modo de generalizar su aplicación.

Pero, aun cuando la agricultura local se asiente, ¿cómo puede promover la durabilidad y no el crecimiento?

Probablemente los activos más importantes a nuestro alcance con miras a una estabilidad duradera, sobre todo en época de alteraciones ecológicas, sean unos suelos de buena calidad. Suelos que nos permitan cultivar abundantes alimentos, que absorban gran cantidad de agua, pues la pluviosidad aumenta sin cesar, y que retengan esa precipitación durante las sequías prolongadas, cada vez más frecuentes. Ese tipo de suelos se favorece precisamente con las prácticas agrícolas locales, que causan un débil impacto ambiental y consumen escasos recursos, no con la agricultura industrializada, que los destruye.

La autonomía local parece atractiva, pero ¿cómo es posible resolver la cuestión de la deuda pública sin crecimiento? El Departamento del Tesoro estadounidense afirma que la única solución "no traumática" es el crecimiento. ¿Necesitaremos un período de transición para que el crecimiento elimine la deuda, y apuntarnos luego a la durabilidad?

Una solución "no traumática" es sólo una manera de aplazar el problema. Es como "páguerme ahora, o págueme más tarde". La pregunta política fundamental es: ¿Podremos cambiar a tiempo para evitar desastres universales que son posibles e incluso probables? ¿Cómo podemos lograr acelerar esas transiciones?

¿Cuál es la acción prioritaria más importante?

Modificar el precio de la energía para que refleje el daño que infiere al entorno. Si el combustible fósil reflejase ese coste, los nuevos sistemas y transiciones se impondrían mucho más deprisa. Fijar un límite al carbono que haga elevar su precio es imprescindible para lograr cualquier resultado.

No será fácil convencer de la necesidad de encarecer el carbono...

No hay una salida fácil a la crisis en que nos encontramos. Pero podemos crear un mundo con nuevas cualidades, entre ellas un mayor sentido comunitario y una relación más intensa con nuestros semejantes y con la naturaleza. Durante largo tiempo se ha promovido el consumo en menoscabo de la comunidad. Desde el final de la Segunda Guerra Mundial en EE.UU. se han ido construyendo casas cada vez mayores y más separadas. El sentido de comunidad se ha perdido. El estadounidense medio tiene hoy la mitad de amigos íntimos que hace 50 años. No sorprende, pues, que nos sintamos menos felices, aunque nuestro nivel material de vida se haya triplicado. Esta perspectiva nos permite imaginar el tipo de cambio que necesitamos. Ceder en crecimiento para conseguir durabilidad no supone una pérdida total: se perderá en unos aspectos y se ganará en otros.



BILL MCKIBBEN al frente de sus partidarios en Times Square de Nueva York, durante el día internacional de acción climática el 24 de octubre de 2009, uno de los 5200 eventos que organiza su grupo 350.org en 181 países.

CORTESIA DE BRETT FOREMAN



Cuestiones fundamentales de cosmología

¿Cómo surgió la asimetría entre materia y antimateria? ¿De qué se compone la materia oscura? ¿Qué es la energía oscura? Los cosmólogos europeos aspiran a responder a estas cuestiones antes del año 2020. Un equipo de trabajo presenta algunas propuestas

Peter Schneider

TIM SCHRABBACK Y THOMAS ERBEN, AIFA, BONN/*Sterne und Weltraum*

1. EL CUMULO DE GALAXIAS RXJ 1347-1145. Se sabe que su masa excede, con mucho, a la de las estrellas que lo componen. Esta extraña conclusión puede deducirse a partir de la posición de los arcos luminosos claramente reconocibles en el centro del cúmulo. Se trata de imágenes de galaxias lejanas, cuya luz es desviada por la atracción gravitatoria del cúmulo, mucho más intensa que la que generaría la masa que podemos ver.

En el transcurso de los últimos años, nuestra comprensión de la cosmología ha experimentado un avance notable. Por primera vez, disponemos de un modelo estándar que describe todas las observaciones cosmológicamente relevantes. Dicho modelo es ciertamente curioso: según el mismo, sólo un 4 por ciento del contenido de energía y materia de nuestro universo consta de materia normal, es decir, de núcleos atómicos y electrones. El resto es "oscuro", se encuentra formado por algo que, a falta de una comprensión más precisa, designamos *materia oscura* y *energía oscura* (*véase la figura 2*).

Como tantas veces sucede en el ámbito científico, los nuevos conocimientos aportan más preguntas que respuestas. Hasta que no entendamos qué física esconden los conceptos de materia y energía oscuras no podremos aspirar a una imagen completa de nuestro cosmos.

Indicios de materia oscura

El primer indicio relativo a la materia oscura lo halló Fritz Zwicky en los años treinta del siglo pasado. A partir de sus observaciones del cúmulo galáctico de Coma, dedujo que el efecto gravitatorio de la materia visible no bastaba para mantener a las galaxias en el seno del cúmulo. No obstante, la mayoría de los astrónomos de la época rechazó aquella conclusión.

Las tesis de Zwicky no recibirían apoyo hasta el decenio de los sesenta, a raíz de los estudios sobre la dinámica de rotación de las galaxias espirales. A semejanza del movimiento de los planetas alrededor del Sol, la velocidad de rotación $V(R)$ del gas y las estrellas en una galaxia depende tanto de la distancia R al centro de la misma como de la masa comprendida entre el centro y el radio de la órbita. Así, si se mide la velocidad de las estrellas en función de la distancia R al centro galáctico, puede determinarse la distribución de masa en la galaxia. Dicho cálculo pone de manifiesto que la masa de estas galaxias es considerablemente mayor que la de las estrellas y el gas que las componen y que podemos ver. Esta materia adicional no es visible: ni emite ni absorbe radiación electromagnética. La existencia de dicha "materia oscura" sólo puede inferirse a partir de sus efectos gravitatorios.

Hoy sabemos que menos de un cinco por ciento de la composición total de los cúmulos de galaxias es materia normal o "bariónica" (los bariones son un tipo de partículas elementales entre las que se cuentan los protones y neutrones). La materia bariónica es la que forma las estrellas y el gas caliente del medio intergaláctico.

Ese resultado se obtiene al comparar la masa bariónica con la masa total de los cúmulos de galaxias. La masa bariónica es relativamente fácil de detectar a partir de los rayos X emitidos por el gas caliente y a partir de la luminosidad de las estrellas. Por su parte, la masa total de un cúmulo puede establecerse por tres métodos:

- El movimiento de las galaxias en el interior del cúmulo se determina a partir del desplazamiento Doppler de las líneas espectrales. Asumiendo que un cúmulo se encuentra en equilibrio dinámico, es posible calcular la masa necesaria para contrarrestar la velocidad de escape de las galaxias y mantenerlas ligadas gravitacionalmente en el cúmulo.
- El gas caliente de los cúmulos también escaparía de no impedirlo la atracción gravitatoria. Por tanto, la masa de un cúmulo resulta de imponer que la presión del gas quede equilibrada por la fuerza de atracción gravitatoria.
- Los campos gravitatorios desvían la luz. Este efecto de "lente gravitacional" es tanto más acusado cuanto mayor es la masa de la "lente". En el caso de los cúmulos galácticos, se observan fenómenos tan espectaculares como el que ilustran los arcos luminosos de la figura 1. La masa de un cúmulo se evalúa al comparar la posición de estos arcos con la de las fuentes luminosas de fondo que los generan.

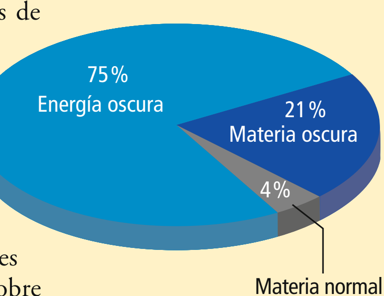
Estos tres métodos, totalmente distintos, arrojan por lo general resultados mutuamente concordantes. Indican que los cúmulos de galaxias contienen entre cinco y seis veces más materia que la aportada por la materia bariónica.

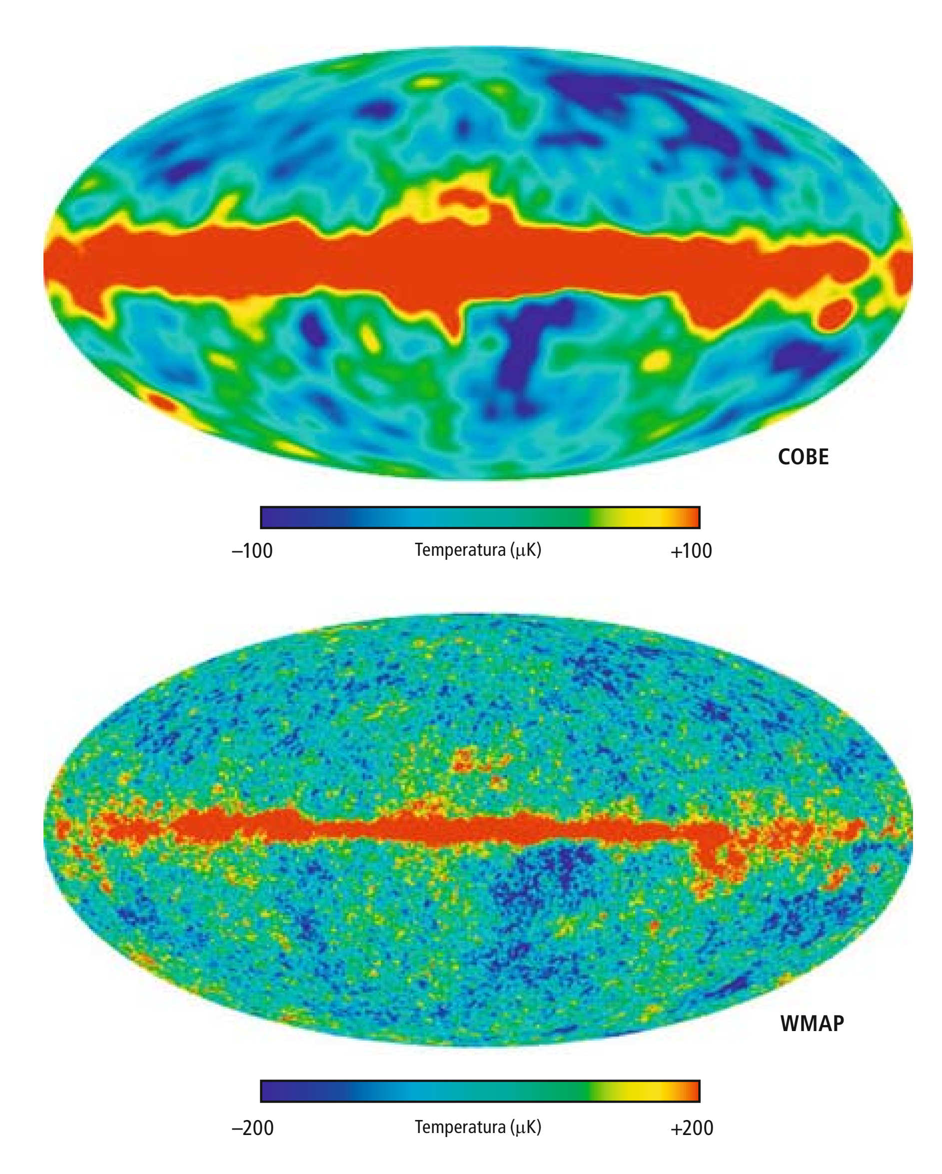
Por otra parte, la existencia de materia oscura a escalas cosmológicas se deduce a partir del proceso de formación de estructuras en el universo. A este respecto han resultado cruciales las observaciones de los últimos años sobre

CONCEPTOS BASICOS

- El modelo cosmológico estándar concuerda espectacularmente bien con las observaciones. No obstante, según el mismo, el 96 por ciento del cosmos está formado por cierto tipo de materia y energía de naturaleza completamente desconocida.
- Se cree que los constituyentes de la "materia oscura" podrían ser partículas elementales aún por descubrir. La "energía oscura" se interpreta como la energía del vacío, uno de los conceptos básicos en teoría cuántica de campos. Sin embargo, el cálculo teórico de esta cantidad difiere en 120 órdenes de magnitud del valor observado.
- La resolución de estas y otras incógnitas cosmológicas bien podría transformar radicalmente nuestra visión del cosmos y de la física fundamental.

2. LA COMPOSICION DE NUESTRO COSMOS se asemeja a una *pizza* que nadie ha encargado y de la que sólo se puede saborear una pequeña parte. Menos del cinco por ciento de nuestro universo está formado por materia normal. Casi una cuarta parte consta de materia oscura fría; el resto es energía oscura.





3. LOS MAPAS DE TEMPERATURA DEL FONDO COSMICO DE MICROONDAS fueron elaborados primeramente por el satélite COBE (*arriba*) y después, con una mayor resolución, por el WMAP. En ambas representaciones se han sustraído los 2,73 grados kelvin de la temperatura media, al igual que la componente debida al movimiento del Sol con respecto al "sistema de referencia de reposo" de la radiación de fondo. En la zona central de ambos mapas puede reconocer se claramente la emisión de microondas del disco galáctico (independiente de la radiación de fondo). A partir del análisis estadístico de estos mapas de temperatura se obtiene una enorme información sobre la composición y estructura de nuestro universo.

el fondo cósmico de microondas. Esta radiación, omnipresente en el cosmos, es la impronta dejada por los fotones unos 380.000 años después de la gran explosión. En ese momento, los protones y electrones de la "sopa primigenia" ya se habían enfriado lo suficiente como para unirse ("recombinarse") y formar los primeros átomos neutros. En ausencia de partículas cargadas libres, el universo se tornó transparente al paso de fotones. Esos fotones liberados en aquel momento aún siguen llegando hasta nosotros desde las regiones distantes del cosmos; son los que hoy componen el fondo de microondas.

Como demostraron los datos del satélite COBE (Cosmic Background Explorer, "Explorador del Fondo Cósmico"), la temperatura del fondo cósmico de microondas es casi isótropa; es decir, depende muy poco de la dirección del cielo en la que miremos. Sus desviaciones de la isotropía son extremadamente pequeñas, con amplitudes relativas del orden de 10^{-5}. Estas fluctuaciones en la temperatura del fondo de microondas reflejan las variaciones de densidad en el universo en el momento de la recombinación. El descubrimiento de estas anisotropías, merecedor del premio Nobel de física en 2006, implica la existencia de materia oscura ya que, sin ella, esas pequeñas variaciones de densidad de entonces no habrían podido crecer hasta alcanzar la escala observada hoy en día.

Energía oscura: el renacimiento de la constante cosmológica

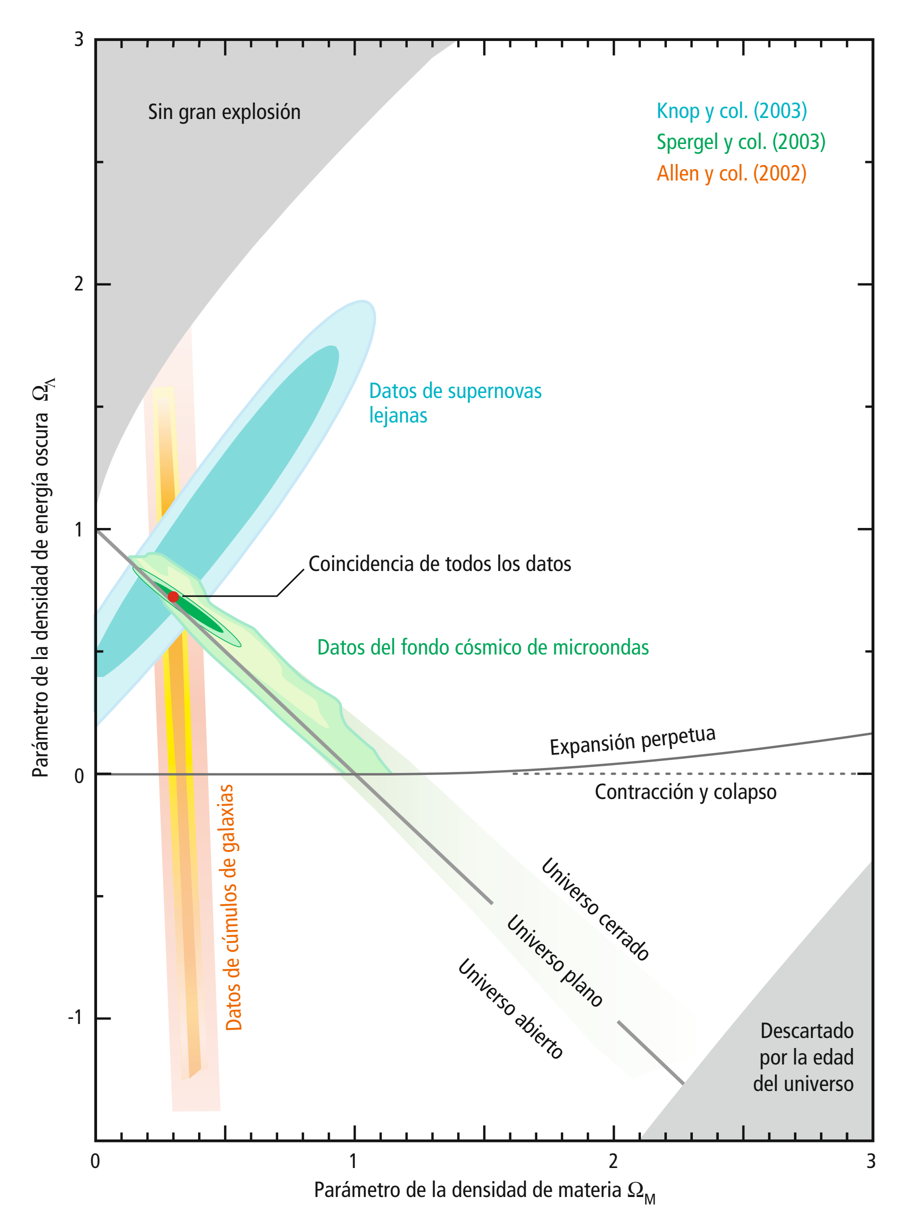
En 1998, dos equipos de investigadores realizaron un descubrimiento totalmente inesperado cuando estudiaban el brillo de supernovas de tipo Ia muy lejanas. Las supernovas de esta clase pertenecen al grupo de objetos que en astrofísica se conocen como "candelas estándar": astros de luminosidad constante y conocida, por lo que a partir de su brillo aparente puede deducirse la distancia a la que se encuentran. Así, el estudio de su brillo como función del corrimiento al rojo sirve para determinar la relación entre el corrimiento al rojo y la distancia. (El "corrimiento al rojo" de la luz de un objeto distante permite calcular a qué velocidad se aleja ese objeto de nosotros como consecuencia de la expansión del universo.)

Los resultados de esos estudios demostraron que el universo se expande aceleradamente; es decir, que la velocidad de expansión del universo aumenta con el tiempo. Este comportamiento era contrario a todas las expectativas, dado que, en principio, la atracción gravitatoria debería frenar la expansión cósmica.

Sin embargo, una expansión acelerada es posible siempre que la "constante cosmológica" (Λ) sea distinta de cero. En un primer momento, Albert Einstein añadió "a mano" la constante cosmológica en sus ecuaciones de la teoría de la relatividad general a fin de que las mismas describiesen un universo estático. Sin embargo, tras la observación de Georges Lemaître (en 1927) y la posterior confirmación de Edwin Hubble (en 1929) de que el universo se expande, Einstein desestimaría la constante cosmológica. Con todo, si Λ es distinta de cero, las ecuaciones de Einstein para la expansión del universo pueden describir una expansión acelerada.

Pero ese término extra puede interpretarse de varias maneras. En particular, las ecuaciones de Einstein con constante cosmológica son equivalentes a las mismas ecuaciones sin dicha constante, siempre y

4. LA DENSIDAD DE ENERGIA OSCURA FRENTE A LA DENSIDAD DE MATERIA de nuestro universo. La gráfica representa los valores de estos parámetros (en unidades apropiadas Ω_Λ y Ω_M) medidos a partir de diferentes métodos: la anisotropía del fondo de microondas (*verde*), las supernovas de tipo Ia (*azul*) y la densidad numérica de cúmulos de galaxias en función de su corrimiento al rojo (*naranja*). Dado que los márgenes de confianza de cada conjunto de datos exhiben orientaciones distintas, su intersección permite delimitar con gran claridad el rango de valores permitidos para ambos parámetros. La pequeñez de cada uno de los márgenes de confianza individuales y el hecho de que se solapen se interpreta como un alto grado de autoconsistencia del modelo cosmológico estándar.



DE: "NEW CONSTRAINTS ON Ω_M, Ω_Λ AND *w* FROM AN INDEPENDENT SET OF ELEVEN HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE OBSERVED WITH HST", POR R. A. KNOP Y COL., EN *ASTROPHYSICAL J.* 598, 102; 2003./*Sterne und Weltraum*

cuando asignemos al vacío una densidad finita de energía.

Por extraño que pueda parecer, la idea de asignar una densidad de energía al espacio vacío es ciertamente plausible en el contexto de la mecánica cuántica. En teoría cuántica de campos, todos los campos (como el electromagnético, por ejemplo) poseen una energía distinta de cero aun cuando se encuentran en el estado de energía más baja posible (es decir, el estado sin excitaciones o sin partículas: lo que llamamos "vacío"). En el caso de la constante cosmológica, la misma puede interpretarse como esa energía fundamental del espaciotiempo mismo.

La energía del vacío sólo es observable a partir de sus efectos gravitatorios, ya que cualquier otra interacción física sólo mide *diferencias* de energía. Por ejemplo, la frecuencia del fotón emitido por un átomo sólo guarda relación con la diferencia de energía entre los dos niveles entre los que tiene lugar la transición electrónica, pero la energía del vacío del campo electromagnético no modifica la frecuencia del fotón emitido. La atracción gravitatoria, en cambio, depende de *toda* la masa y energía presentes en cierta región del espacio, lo que también incluye la energía del vacío. De ahí que se empleen con frecuencia los conceptos de "constante cosmológica", "densidad de energía del vacío" o "energía oscura" como sinónimos, si bien existen pequeñas diferencias entre los significados precisos.

Esas conclusiones extraídas a partir de las supernovas de tipo Ia fueron confirmadas, de forma totalmente independiente, por las mediciones de las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas. En particular, el satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, "Sonda Wilkinson para las Anisotropías del Fondo de Microondas"), sucesor del COBE, ha corroborado este resultado, apuntalando de manera impresionante el modelo cosmológico estándar (*véase la figura 3*).

Por otra parte, ese resultado concuerda con la combinación de otras dos observaciones: por un lado, que, tal y como se desprende de la distribución del fondo cósmico de microondas, la geometría de nuestro universo es plana (aquí "plano" no quiere decir "bidimensional", sino que hace referencia a las propiedades geométricas del universo; por ejemplo, que la suma de los ángulos de un triángulo es 180 grados); por otro, la baja densidad media de materia obtenida a partir de la distribución de galaxias y la densidad de cúmulos galácticos.

Vemos, pues, que la robustez del modelo cosmológico estándar con materia y energía oscuras reside en que cada parámetro cosmológico queda determinado por al menos dos métodos independientes que conducen a resultados concordantes (*véase la figura 4*).

El grupo de cosmología fundamental de la ESA-ESO

En septiembre de 2003, la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Observatorio Europeo Austral (ESO) acordaron crear equipos de trabajo conjuntos para avanzar en las cuestiones clave de la investigación astronómica. A uno de esos grupos se le asignó, como área de investigación, la cos-

Un proyectil galáctico delata a la materia oscura

El cúmulo de galaxias 1E 0657-56, también conocido bajo el nombre de Cúmulo Bala, consta en realidad de dos cúmulos galácticos en interacción. Aquí, sobre una imagen óptica de fondo, se han superpuesto las emisiones en rayos X (*rojo*), así como la distribución de materia (*azul*) según fue determinada a partir de los efectos de lente gravitacional.

A partir de la morfología y distribución de temperaturas del gas, se deduce que el cúmulo más pequeño (*derecha*) ha atravesado, a modo de proyectil, al más grande. La fricción resultante ha calentado y frenado al gas, por lo que el gas perteneciente al cúmulo menor ha quedado retrasado con respecto a la posición de éste. Por su parte, el gas del cúmulo mayor ha sido parcialmente "rasgado" y desplazado de sus respectivas galaxias.

Los estudios muestran inequívocamente que gran parte de la distribución de masa armoniza espacialmente con las posiciones de las galaxias. Sin embargo, casi toda la masa bariónica se halla en el gas caliente, lo que implica que una gran proporción de la masa total ha de contener una componente no bariónica; es decir, materia oscura. El Cúmulo Bala constituye una prueba contundente de la existencia de materia oscura. Teorías alternativas de la gravedad tampoco lograrían eludir semejante conclusión.



NASA/CXC/CFA/M. MARKEVITCH ET AL.; NASA/STSCI; ESO WFI; MAGELLAN/U. ARIZONA/D. CLOWE ET AL./*Sterne und Weltraum*

mología fundamental. Formaban parte del mismo John Peacock (Observatorio Real de Edimburgo), el autor (Instituto Argelander de Astronomía de Bonn), George Efstathiou (Instituto de Astronomía de Cambridge), Jonathan Ellis (CERN), Bruno Leibundgut (ESO), Simon Lilly (Escuela Politécnica de Zúrich) y Yannick Mellier (Instituto de Astrofísica de París). El grupo contó asimismo con el asesoramiento de otros investigadores de prestigio y reconocidos por sus aportaciones fundamentales en el campo. El informe del grupo se publicó en octubre de 2006; aquí daremos cuenta de sus principales resultados y recomendaciones.

La tarea consistía en evaluar aquellos aspectos esenciales de la cosmología cuya resolución con métodos astronómicos se estimaba exitosa. Hay que descartar que, en un futuro próximo, la cosmología cuente con recursos equiparables a los experimentos en física de partículas. En consecuencia, había que identificar con acierto aquellos experimentos especialmente prometedores.

Si bien a menudo los puntos esenciales de una investigación evolucionan con el tiempo y se ven influidos por la aparición de nuevos resultados, la planificación y puesta en marcha de los grandes experimentos requiere, por lo general, varios años. Así pues, el período contemplado en el informe abarca hasta 2020. Se incluye, además, el documento *"Cosmic Vision 2015–2025"* de la ESA, en el que se detallan los planes y visiones a largo plazo de la investigación europea del espacio.

Las recomendaciones de este equipo se basaron en una serie de consideraciones que, ordenadas según su importancia, se exponen a continuación.

Las cuestiones esenciales de la cosmología

El modelo estándar del universo, con su componente dominante de materia y energía oscuras, plantea una serie de preguntas fundamentales:

■ **¿Cómo surgió la asimetría entre materia y antimateria?** En el primer segundo posterior a la gran explosión, había casi tantos electrones y positrones (las antipartículas de los electrones) como fotones. En cambio, hoy en día, la proporción es de varios miles de millones de fotones por cada electrón en el cosmos. La causa es el enfriamiento de la materia debido a la expansión del universo, así como la posterior desintegración de partículas y antipartículas en fotones. Lo sorprendente es que actualmente casi no hay positrones en el universo, si bien las leyes físicas describen una simetría completa entre partículas y antipartículas. Del mismo modo, en el universo hay protones y neutrones, pero no sus antipartículas, por más que en un estadio muy temprano y caliente del desarrollo cósmico sus densidades respectivas debieron haber sido casi del mismo orden. Aparentemente, algún proceso debió haber roto esta simetría, favoreciendo la presencia de la materia sobre la de antimateria. Pero, ¿cuál es el mecanismo responsable?

■ **¿De qué se compone la materia oscura?** Si bien somos capaces de determinar su densidad con una precisión superior al diez por ciento, desconocemos cuál es la naturaleza de la materia oscura. A partir de la distribución de materia a gran escala en el universo, reflejada en la distribución de galaxias, se deduce que las partículas de materia oscura han de tener una oscilación térmica muy pequeña: la materia oscura es "fría".

Si no fuese fría, la excitación térmica provocaría que se disipase con facilidad, impidiendo a su vez la agrupación de las concentraciones de masa que observamos hoy en día. Sólo las estructuras muy grandes habrían podido formarse. Por el contrario, la densidad observada de galaxias en el universo es muy superior a la de los cúmulos galácticos, algo especialmente válido en las épocas tempranas del universo.

Ello excluye a los neutrinos como candidatos a componentes de la materia oscura, ya que, debido a su pequeñísima masa, habrían de tener una velocidad demasiado grande; serían materia oscura

“caliente”. Por otra parte, la posibilidad de que la materia oscura se componga principalmente de objetos compactos pero no visibles (como enanas blancas, agujeros negros o estrellas de neutrones) queda excluida a partir de las observaciones sobre los efectos de lente gravitacional. ¿Se compone la materia oscura de un tipo de partículas elementales aún no descubiertas en el laboratorio, como predicen las teorías modernas de partículas elementales (como la supersimetría) o se trata de algo aún más exótico?

■ **¿Qué es la energía oscura?** El descubrimiento de la expansión acelerada del universo y, por consiguiente, de una densidad de energía del vacío no nula (o energía oscura) es el hallazgo probablemente más difícil de entender en cosmología.

Si se le pide a un físico de partículas que evalúe la densidad de energía del vacío, nos proporcionará rápidamente una estimación de la misma. El problema radica en que el valor obtenido a partir de las teorías actuales es unas 10^{120} veces mayor que el medido por los cosmólogos. Esta estimación, quizá “la peor en toda la historia de la física”, ilustra el desafío que entraña comprender la naturaleza de la energía oscura. Es de suponer que, para su resolución, será necesaria una teoría completamente nueva de las interacciones fundamentales. ¿Es la energía oscura la constante cosmológica introducida por Einstein, o se trata de un fenómeno dinámico que se ha ido desarrollando en el curso de la expansión cósmica?

■ **¿Comenzó nuestro universo con una inflación?** Un elemento crucial en el modelo estándar del universo es una fase que los cosmólogos denominan “inflación”: durante una minúscula fracción de segundo tras la gran explosión, el cosmos se expandió un gigantesco factor antes de comenzar su expansión “normal”. El modelo inflacionario explica numerosas características del universo tal y como lo conocemos hoy en día; en particular, la distribución casi isótropa de la temperatura del fondo cósmico de microondas. Sin embargo, falta todavía una prueba directa de la existencia de una fase inflacionaria temprana. ¿Es posible hallar tal prueba?

Hasta ahora, tampoco disponemos de un modelo teórico definitivo sobre la inflación. ¿Es posible hallar algún vestigio de la fase inflacionaria que aporte una prueba de la misma y que permita, asimismo, discriminar entre los diferentes modelos que la describen?

■ **¿Estamos en el camino correcto?** Las conclusiones derivadas de los modelos cosmológicos suponen implícitamente que las leyes físicas que observamos “aquí y ahora” han sido siempre las mismas en todo tiempo y lugar. Si bien tal supuesto es muy difícil de verificar, no es menos cierto que el mismo ha dado lugar a un número impresionante de predicciones confirmadas.

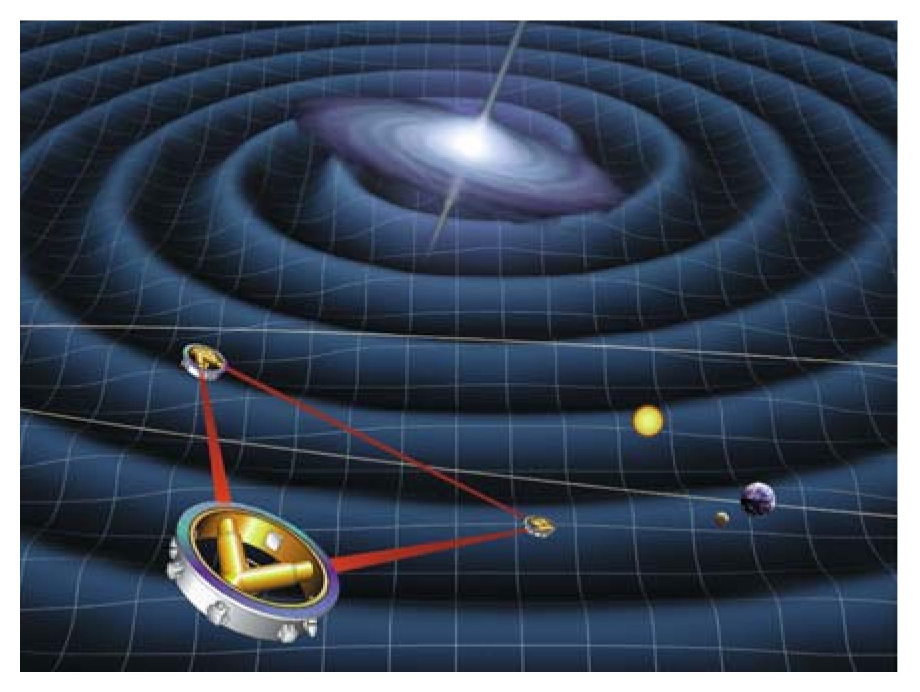
Por ejemplo, el modelo cosmológico estándar predice con gran exactitud la abundancia observada de elementos químicos ligeros, los cuales se formaron unos tres minutos después de la gran explosión. Esta predicción asume que las leyes de la física nuclear y de la termodinámica eran, tres minutos después del *Big Bang*, las mismas que hoy conocemos.

En particular, las leyes de la relatividad general han sido confirmadas de manera espectacular, desde la descripción del movimiento del sistema solar hasta el comportamiento temporal de un púlsar doble. No obstante, aún existen dudas sobre su validez a escalas extremadamente grandes o pequeñas. ¿Puede que la inferencia de la materia o la energía oscuras no resulte sino de una teoría incompleta de la gravitación? ¿Pueden cambiar con el tiempo las “constantes” de la naturaleza?

¿Cuáles de estas preguntas puede responder la astronomía?

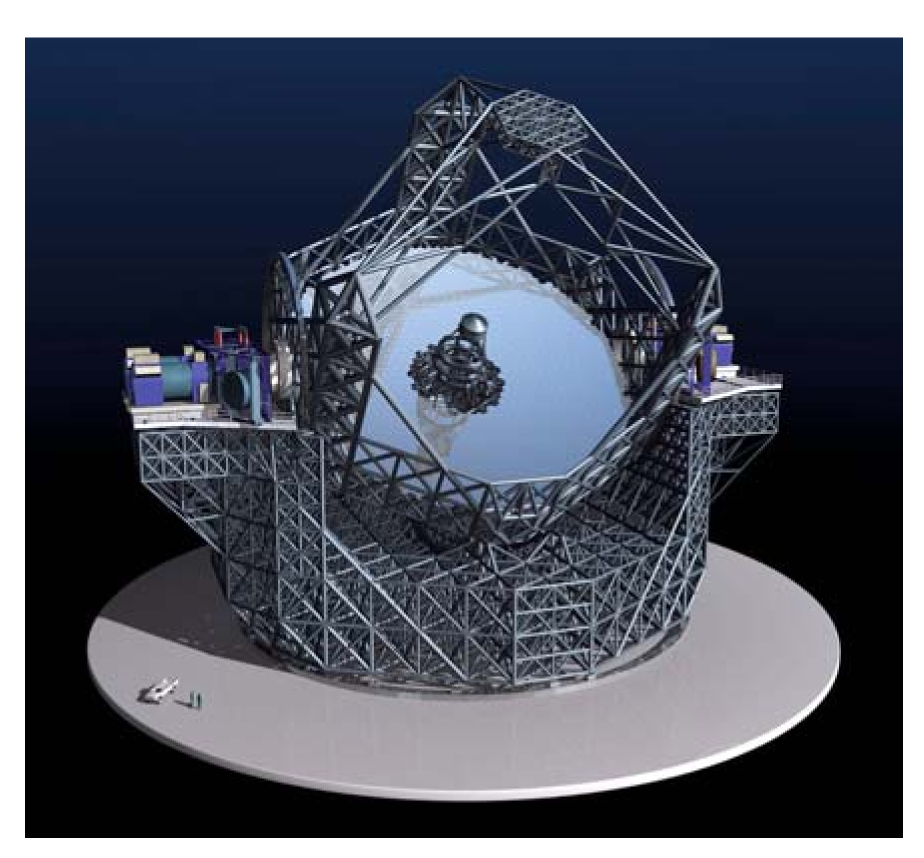
Ante todo, procede hacer algunas precisiones. En primer lugar, parece improbable que las observaciones astronómicas ofrezcan nuevas perspectivas para resolver el problema de la asimetría entre materia y antimateria. Por otra parte, es posible que la naturaleza de la materia oscura acabe desentrañándose en experimentos de laboratorio. A este respecto, contamos con dos tipos de experimentos especialmente prometedores: por un lado, se confía en hallar indicios de supersimetría en los grandes aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN en Ginebra, en funcionamiento desde finales de 2009. Las partículas supersimétricas figuran entre los candidatos más naturales a constituyentes de la materia oscura. Por otro lado, existen experimentos, proyectados a varios kilómetros de profundidad bajo la superficie terrestre, en los que se intenta detectar directamente los choques de partículas de materia oscura con los núcleos atómicos del material detector.

En cualquier caso, también se esperan contribuciones esenciales por parte de los experimentos astronómicos. Por ejemplo, la distribución espacial de materia oscura nos ofrece indicios sobre sus características. Además, existe la posibilidad de



NASA/Sterne und Weltraum

5. EL PROYECTO LISA (tres satélites separados por distancias de unos cinco millones de kilómetros) pretende detectar ondas gravitacionales. Ello aportaría información sobre la fase inflacionaria de la expansión cósmica.



6. UN TELESCOPIO DE 42 METROS, como el E-ELT proyectado por el ESO, realizaría valiosas contribuciones a muchas cuestiones fundamentales de la cosmología. Sólo con un telescopio como éste podrán obtenerse mediciones de precisión de cuásares y galaxias muy lejanas.

ESO/Sterne und Weltraum

observar directamente, con telescopios de rayos X o rayos gamma, la aniquilación de partículas de materia oscura en regiones densas, tales como el centro de nuestra Vía Láctea [*véase* “El telescopio Fermi cumple dos años”, por Néstor Mirabal, *en este mismo número*].

Por otra parte, las observaciones astronómicas ofrecen presumiblemente la mejor posibilidad para explorar una presunta variación temporal de las “constantes” de la naturaleza; por ejemplo, a partir de las medidas de precisión de los espectros de objetos lejanos.

Por último, la investigación empírica de la energía oscura o la inflación requiere, según nuestros conocimientos actuales, el mayor laboratorio del que disponemos: nuestro universo. Estas dos cuestiones dependen de manera crucial de las técnicas astronómicas.

¿Qué métodos son los adecuados?

La energía oscura se hace notar por su influencia en la tasa de expansión del universo, lo que podemos observar a partir de la relación entre el corrimiento al rojo y la distancia de las fuentes luminosas. Además, el hecho de que la energía oscura contribuya a una expansión acelerada nos dice que sus efectos son contrarios a los de la gravedad (cuya interacción atractiva tiende a frenar la expansión). Esto implica que otro de los efectos de la energía oscura es ralentizar los procesos de formación de estructuras en el universo.

Se han identificado cuatro métodos prometedores para investigar la energía oscura. Además de las supernovas Ia, se consideran la distribución de frecuencias de los cúmulos de galaxias, el efecto de lente gravitacional débil y la distribución espacial de galaxias.

En este último caso, cuenta con un extraordinario valor la medición, en función de su corrimiento al rojo, de cierta escala de longitud estándar: una longitud característica en la distribución global de galaxias que se conoce con el nombre de “horizonte de sonido en el momento de la recombinación”. Se define como la distancia recorrida por una onda sonora en los primeros 380.000 años posteriores a la gran explosión (es decir, hasta el momento de la recombinación, cuando se liberó la radiación que compone el fondo de microondas).

El horizonte de sonido es fácilmente reconocible en las fluctuaciones de la temperatura del fondo de microondas. También fue observado hace pocos años en la distribución local de galaxias. Gracias a esta escala disponemos de una “regla universal” de longitud conocida, especialmente adecuada para medir la ley de expansión del universo.

El grupo de trabajo intentó valorar los diferentes métodos. Para conseguir datos cosmológicos precisos, cada uno de ellos requiere, ante todo, conjuntos mucho mayores de datos. De esta manera, los errores sistemáticos ganan peso frente a los estadísticos, de modo que son aquellos los que acaban por definir los límites de precisión alcanzables. Algunos de estos errores sistemáticos empezarán a conocerse sólo cuando se hayan reducido adecuadamente los errores estadísticos; es decir, cuando se disponga de mayor cantidad de datos. Existe cierta incertidumbre en la evaluación de la precisión alcanzable. Debido a la crucial importancia que la energía oscura representa para la física fundamental, elegir sólo uno de estos cuatro métodos para su estudio representa, en nuestra opinión, un riesgo inasumible.

Por su parte, las propiedades de la materia oscura se reflejan en su distribución espacial, la cual también puede estudiarse mediante dos de los métodos arriba mencionados: el efecto de lente gravitacional débil y la distribución de galaxias. Un papel fundamental también lo desempeña la distribución espacial del gas difuso con un gran corrimiento al rojo; ésta puede analizarse a partir de las líneas de absorción de cuásares muy lejanos.

Por último, la física de los modelos inflacionarios puede estudiarse básicamente con tres métodos: la polarización del fondo cósmico de microondas, la medición de las ondas gravitacionales producidas en la gran explosión y la medición precisa de las fluctuaciones de densidad en el universo a escalas muy grandes y muy pequeñas.

De todas esas técnicas, ¿cuáles pueden llevarse a cabo? Puesto que la próxima generación de observaciones cosmológicas exigirá recursos considerables, es deseable aprovechar los datos provenientes de distintos ámbitos de la astronomía. De manera recíproca, y aun cuando los aspectos cosmológicos representen el objetivo científico primordial de al-

gunos proyectos, una amplia gama de aplicaciones elevaría el valor científico de los diferentes experimentos y contaría con un mayor respaldo de la comunidad astronómica.

Recomendaciones

A partir de las consideraciones expuestas, nuestro grupo de trabajo formuló las siguientes recomendaciones:

(1) La ESA y el ESO cuentan con una oportunidad única para explorar conjuntamente una gran parte del cielo en varias bandas del espectro. Para ello habrían de combinarse un telescopio espacial, portador de una cámara de gran angular en el óptico y el infrarrojo cercano, con la fotometría óptica de telescopios terrestres. Si bien los proyectos KIDS y VIKING (en los telescopios VST y VISTA del ESO) representan un papel pionero en este tipo de observaciones, es necesaria una notable mejora en la velocidad de transmisión de datos y en la calidad de las imágenes. A tal fin, sugerimos que:

- Una de las máximas preferencias de la ESA sea disponer de un satélite con una cámara en el infrarrojo cercano y con una cámara óptica de alta resolución angular.
- La construcción de dispositivos para tomas ópticas de gran angular con prestaciones claramente superiores a las del VST sea asumida por el ESO como una de sus principales prioridades.
- El ESO lleve a cabo un amplio estudio espectroscópico, con el objetivo de medir el corrimiento al rojo de más de 100.000 galaxias tenues.

Un estudio combinado de ese tipo sería de valor inestimable para varios de los métodos mencionados más arriba. La fotometría en varias bandas del espectro permite determinar, sin necesidad de registrar sus espectros, el corrimiento al rojo de las galaxias. Gracias a la técnica del "corrimiento al rojo fotométrico" se obtendrán las distancias de más de mil millones de galaxias, algo imposible si en los próximos 15 o 20 años se recurre exclusivamente a métodos espectroscópicos. Disponer de los datos sobre estas distancias resulta imprescindible para estudiar la energía oscura a partir de los métodos de lente gravitacional débil y el de la distribución espacial de galaxias.

No obstante, el mencionado estudio espectroscópico se requiere para contrastar los resultados anteriores. Los datos ópticos de alta resolución obtenidos con el telescopio espacial permitirían medir con precisión la distribución luminosa de esas galaxias, lo que, a su vez, caracteriza la magnitud del efecto de lente gravitacional débil. Puesto que una distribución luminosa precisa se requerirá sólo en una banda cromática, el resto de los datos en el óptico pueden tomarse desde tierra, a pesar de que la resolución angular quede limitada por la atmósfera. Ello resultaría notablemente menos costoso.

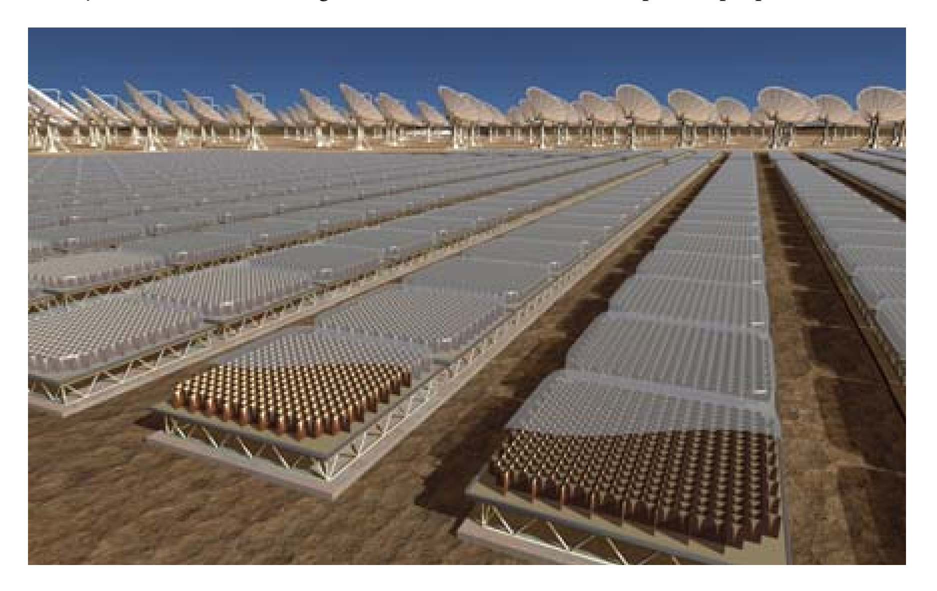
Debido a la atmósfera terrestre, los datos en el infrarrojo cercano sólo pueden obtenerse desde el espacio. Los mismos harán falta para determinar las distancias a los cúmulos de galaxias descubiertos por otros métodos (tales como el satélite de rayos X eROSITA, proyectado bajo dirección alemana y del que se espera que, tras su lanzamiento, previsto para 2012, descubra unos 100.000 cúmulos de galaxias). Estos datos, combinados con los datos obtenidos a partir del corrimiento al rojo fotométrico, resultarían de gran valor para, a partir de la distribución de frecuencias de los cúmulos de galaxias, esclarecer la naturaleza de la energía oscura.

En comparación con el proyecto 2MASS (el sondeo celeste más completo realizado hasta la fecha), el sondeo propuesto aquí sería unas 500 veces más sensible en el infrarrojo cercano y en torno a unas 40 veces más en el óptico. Abarcaría el cuádruple que el Sloan Digital Sky Survey ("Sondeo Celeste Digital Sloam") y contaría con una resolución angular notablemente mejor. Tal recopilación de datos constituiría un legado astronómico comparable al muestreo de Monte Palomar de hace 50 años y sería de incalculable utilidad en prácticamente todos los ámbitos de la astrofísica.

(2) Si bien la medición de distancias a partir del corrimiento al rojo fotométrico basta para muchas aplicaciones, otros métodos requieren un detalle que sólo la espectroscopía puede proporcionar; en particular, la medición del horizonte de sonido. Para ello se necesita un instrumento capacitado para recoger de forma simultánea los espectros de varios miles de galaxias repartidas en un ángulo sólido de un grado cuadrado (unos $3 \cdot 10^{-4}$ estereorradianes). Un instrumento tal podría sondear más de un millón de espectros galácticos y medir con precisión el horizonte de sonido en muchos corrimientos al rojo.

Nuestra recomendación es que el ESO dé acceso a tal instrumento, ya sea a partir del desarrollo propio de las capacidades del telescopio VLT o a través de un proyecto internacional.

(3) Disponer de cámaras de gran angular potentes serviría para ampliar los sondeos de supernovas existentes a día de hoy. Para ello se requieren, sobre todo, mejores datos sobre las supernovas cercanas. Si no se emplease para otros fines, el VST del ESO podría proporcionarlos.



7. UN RADIOTELESCOPIO con una gran superficie, como el proyecto internacional SKA, revolucionaría la astronomía. Podría detectar estructuras del universo temprano y resolver la naturaleza de la energía oscura. Nuestro grupo de trabajo aboga por una fuerte participación de la ESA y el ESO en este proyecto internacional.

XILOSTUDIOS Y SKA PROJECT OFFICE/*Sterne und Weltraum*

(4) Recientemente, en abril de 2010, acaba de acordarse la construcción del E-ELT (del inglés para "Telescopio Europeo Extremadamente Grande") en Atacama (Chile). Con una lente de 42 metros de diámetro, el E-ELT será el mayor telescopio óptico del mundo. A pesar de que el grupo de trabajo admite que otros proyectos astrofísicos constituirán los objetivos más relevantes del E-ELT, anima a que su operación tenga en cuenta los siguientes puntos:

- Los estudios de las supernovas lejanas. Requieren una espectroscopía muy sensible, que sólo el E-ELT podrá aportar.
- Gracias a la espectroscopía de precisión de cuásares muy lejanos, el E-ELT podría revolucionar la investigación del medio intergaláctico, ya que lograría desentrañar su estructura a pequeña escala. Estos resultados, en combinación con las mediciones correspondientes a gran escala (como las que pueden obtenerse a partir del fondo de microondas), resultarían cruciales para investigar las fluctuaciones de densidad en el universo, algo que permitiría contrastar los diferentes modelos inflacionarios.
- La espectroscopía de alta sensibilidad del E-ELT posibilitaría el estudio de una hipotética dependencia temporal de las constantes de la naturaleza.

(5) PLANCK, el satélite de la ESA puesto en órbita en mayo de 2009 y cuyos datos definitivos se esperan para 2012, supondrá un hito en el estudio del fondo cósmico de microondas. Tal y como ya hiciera el WMAP, este satélite elaborará un mapa completo en la banda de microondas, pero con una sensibilidad y resolución angular mucho mayores que su predecesor, así como en una banda más ancha del espectro.

Entre sus objetivos se encuentra la medición precisa de la polarización del fondo de microondas. Dada su gran sensibilidad a las ondas gravitacionales que la fase inflacionaria de la expansión cósmica debería haber generado, su estudio proporcionará una ventana única para atisbar en la física de la inflación. Los estudios posteriores versarán sobre el efecto de lente gravitatoria provocado por la distribución a gran escala de la materia en el universo, el cual modifica la señal de polarización.

Si bien la planificación de la próxima generación de satélites de microondas habrá de esperar a los resultados de PLANCK, sugerimos comenzar cuanto antes con los estudios técnicos preliminares.

(6) En principio, las ondas gravitacionales generadas durante la fase inflacionaria podrían detectarse directamente. El experimento espacial LISA (Laser Interferometer Space Antenna, *véase la figura 5*), un interferómetro láser proyectado por la ESA y la NASA, debería estar capacitado para ello. Pero, aun si no fuese así, los límites que una ausencia de señal implicaría sobre la intensidad máxima de esas ondas suponen un dato de importancia fundamental. Consideramos que los futuros proyectos de la ESA sobre ondas gravitacionales deberían contar con una máxima prioridad.

(7) El proyecto internacional SKA (Square Kilometer Array) consiste en un radiotelescopio extremadamente novedoso y sensible, con una batería de antenas repartidas en una superficie de un kilómetro cuadrado (*véase la figura 7*). El SKA habría de conducir a progresos colosales en radioastronomía y cosmología fundamental. Dispondría del potencial para medir el corrimiento al rojo de unos mil millones de galaxias. Con ello, sondearía la estructura a gran escala del universo y mediría el horizonte de sonido a distancias extremas y con una precisión sin precedentes. Asimismo, es de esperar que el SKA revolucione las observaciones sobre el efecto de lente gravitacional débil.

La realización de este proyecto excede posiblemente el margen temporal que pretenden cubrir las recomendaciones de nuestro informe (hasta 2020). No obstante, este observatorio representa el sucesor natural de gran parte de los proyectos arriba descritos, por lo que aconsejamos la mayor participación posible en el mismo.

Observaciones finales

Las recomendaciones de este equipo de trabajo son exactamente eso: recomendaciones. Las mismas obedecen a los intereses de una disciplina particular, la cosmología fundamental. Es evidente que desde otros ámbitos también habrán de derivarse sugerencias específicas para la consecución de sus respectivos objetivos.

Nuestras recomendaciones atañen a las grandes organizaciones europeas ESA y ESO, así como a los organismos científicos nacionales. A su vez, éstos habrán de ponderar las directrices requeridas por otras ramas de la astrofísica y la cosmología en función de su relevancia para la física en conjunto.

La astrofísica y la cosmología se encuentran hoy, más que nunca, en un camino hacia proyectos cuya realización será posible sólo en un contexto internacional. Por este motivo, la Unión Europea ha promovido la creación de ASTRONET, un marco conjunto para definir la estrategia de la investigación astronómica europea. A partir del documento *"Cosmic Vision 2015–2025"* de la ESA, los grupos de trabajo conjuntos ESO-ESA y otros estudios, ASTRONET desarrollará la perspectiva común de la astronomía europea. Independientemente de cuáles sean sus recomendaciones, los cosmólogos aguardamos, impacientes, un desarrollo excitante de nuestra ciencia.

El autor

Peter Schneider es director y fundador del Instituto Argenlander de Astronomía de la Universidad de Bonn. De 2005 a 2006 fue vicepresidente del grupo de trabajo sobre cosmología fundamental del ESO y la ESA.

Bibliografía complementaria

EL UNIVERSO INFLACIONARIO AUTORREGENERANTE. Andrei Linde en *Investigación y Ciencia*; enero de 1995.

LA CONSTANTE DE HUBBLE Y EL UNIVERSO EN EXPANSION. Wendy Freedman en *Investigación y Ciencia*; junio de 2004.

POLARIZACION DEL FONDO COSMICO DE MICROONDAS. Matthew Hedman en *Investigación y Ciencia*; diciembre de 2005.

REPORT BY THE ESA-ESO WORKING GROUP ON FUNDAMENTAL COSMOLOGY. John A. Peackock, Peter Schneider y col. en ESA-ESO Working Groups, Report n.º 3: "Fundamental Cosmology"; septiembre de 2006.

EL ORIGEN DEL UNIVERSO. Michael S. Turner en *Investigación y Ciencia*; noviembre de 2009.

Genes, cultura y dieta

Biología y cultura interaccionan en el desarrollo de nuestros hábitos alimentarios

Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo

Pocos discutirían la tesis de que en el reino animal las adaptaciones relacionadas con la elección de alimentos y la actividad recolectora tienen un gran impacto en la supervivencia, la reproducción de los individuos y, al final, en su éxito evolutivo. En la especie humana, sin embargo, tendemos a ver la elección de los alimentos como un rasgo cultural no directamente relacionado con nuestro pasado biológico. Ello es cierto para las pequeñas variaciones dietéticas que se dan entre zonas geográficas y entre grupos étnicos (ciertas preferencias alimentarias son más cuestión de gusto que de supervivencia).

Sin embargo, algunas pautas básicas de nuestra nutrición corresponden claramente a caracteres evolutivos, basados en los cambios que las frecuencias génicas sufren de una generación a otra. Como predijo con cautela Charles Darwin en el último capítulo de *El origen de las especies*, su teoría de la selección natural ha arrojado "algo de luz" sobre la evolución humana, incluida la evolución de la dieta. La larga transición de los cazadores-recolectores arcaicos a las sociedades postindustriales ha conllevado importantes cambios en la actividad recolectora y en la dieta humana.

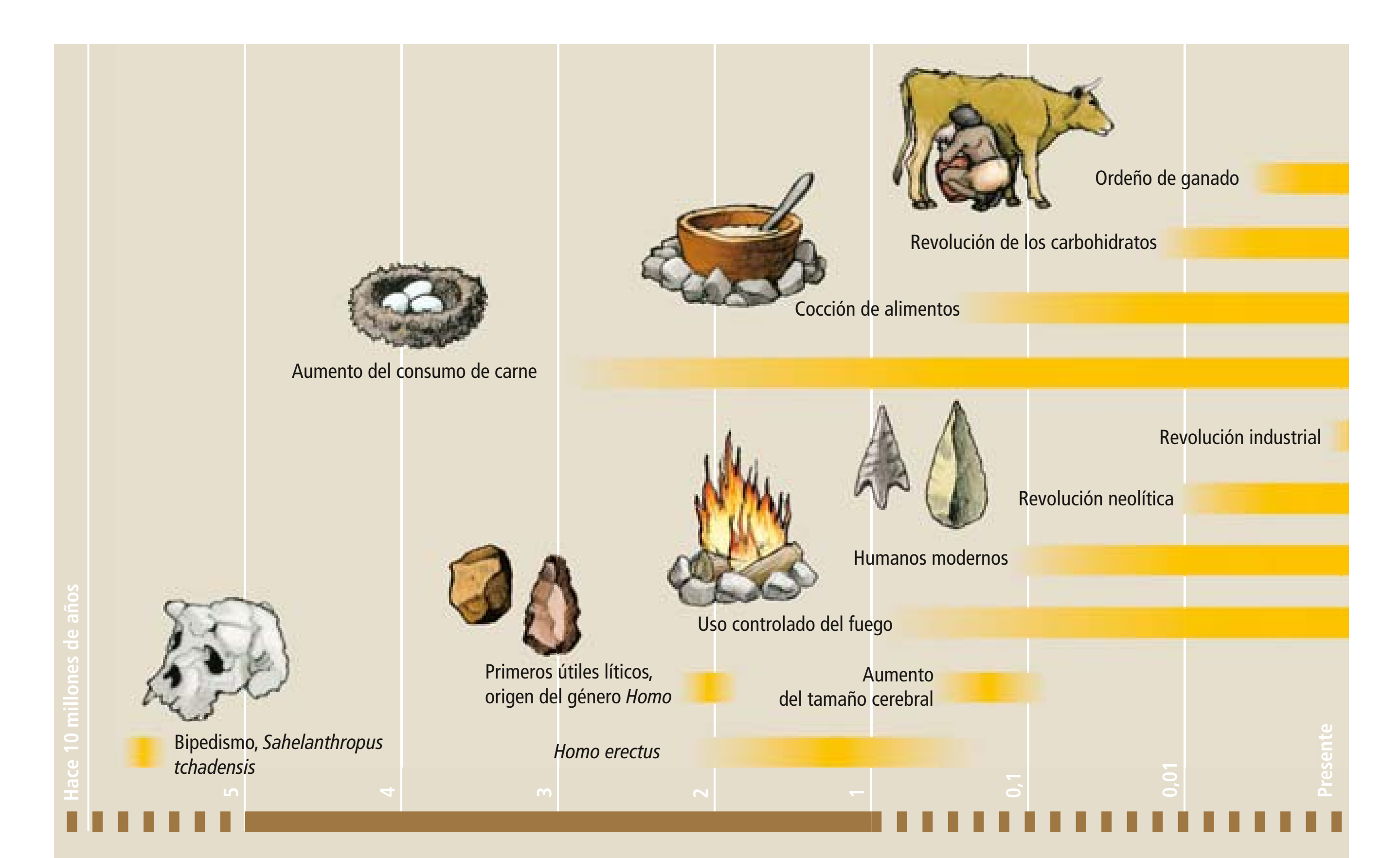
La tesis tradicional mantiene que nuestros antepasados evolucionaron de forma gradual, en el sur y este africanos, de frugívoros a carroñeros o consumidores de carne, por medio de una adaptación puramente biológica a las condiciones cambiantes del medio. Desde los años setenta, sin embargo, ha ido quedando cada vez más claro que esta visión es demasiado simple. La evolución biológica y cultural no son fenómenos separados, sino que interactúan de una manera compleja. Como dijo Richard Dawkins en *El gen egoísta*, lo inusual de nuestra especie puede resumirse en una palabra: cultura.

Una rama de la genética de poblaciones, la teoría de la coevolución genético-cultural, estudia los fenómenos evolutivos que surgen de las interacciones entre los sistemas de transmisión genética y cultural. Parte de este trabajo se basa en la investigación teórica sociobiológica de Charles J. Lumsden y E. O. Wilson, resumida en *Genes, Mind and Culture* (Genes, mente y cultura). Otra línea de investigación se centra en el estudio cuantitativo de la coevolución genético-cultural iniciada, entre otros, por L. L. Cavalli-Sforza y M. W. Feldman. Los modelos matemáticos de la coevolución genético-cultural han mostrado que la transmisión cultural modifica las presiones de la selección; la cultura crea incluso nuevos mecanismos evolutivos, algunos de ellos relacionados con la cooperación humana. A veces, la cultura puede generar presiones selectivas poderosas, debido

CONCEPTOS BASICOS

- La teoría de la coevolución genético-cultural, una rama de la genética de poblaciones, ha demostrado que la transmisión cultural modifica la presión de la selección.
- El uso del fuego y los útiles líticos ejerció una gran influencia en la dieta de nuestros antepasados.
- La domesticación de plantas y animales que se produjo con la revolución agrícola del neolítico se tradujo en una mayor presencia de carbohidratos en nuestra dieta. Ello puede haber conducido a un aumento de las copias del gen humano de la enzima amilasa salival.
- El cambio cultural hacia la producción de leche favoreció la persistencia de la lactasa en humanos adultos.

1. SUELE PENSARSE QUE LA EVOLUCION GENETICA Y LA CULTURAL operan de forma independiente. Sin embargo, investigaciones recientes muestran que esta idea es demasiado simple. Las preferencias culturales por ciertos alimentos pueden favorecer cambios genéticos que ayudan a la gente a sacar partido de los mismos. La cría de animales para la producción de leche, por ejemplo, puede hacer que la frecuencia de tolerancia a la lactosa (la capacidad del adulto para procesar este azúcar lácteo) varíe de una región a otra en el mismo continente: en Tailandia, sólo el tres por ciento de la población presenta tolerancia a la lactosa (*arriba*); en el norte de India, en cambio, donde la actividad lechera es común (*abajo*), el 70 por ciento.



2. LOS PRINCIPALES ACONTECIMIENTOS EN LA EVOLUCION DE LOS HOMINIDOS pueden contemplarse desde la perspectiva de la coevolución genético-cultural. (Adviértanse las escalas logarítmicas a ambos lados del eje temporal, *barra discontinua marrón.*) En contra de la creencia popular, el bipedismo no evolucionó para que las manos quedasen libres para la fabricación y uso de herramientas (un ejemplo del antiguo pensamiento teleológico no aceptado por los científicos). De hecho, la postura erguida precedió a la fabricación de útiles en al menos dos millones de años. Es más, Ardi, el celebrado y bien conservado espécimen de *Ardipithecus ramidus*, parece que caminaba erguido hace ya 4,4 millones de años y quizá podría decirse lo mismo de *Sahelanthropus tchadensis*, mucho más antiguo. La bipedación, un comportamiento social cada vez más complejo, la fabricación de herramientas, el incremento gradual del tamaño corporal y los cambios dietéticos formaron un complejo adaptativo que potenció la supervivencia y la reproducción en el medio cambiante africano. El uso controlado del fuego tuvo un gran impacto en la dieta de nuestros antepasados y ayudó a que nuestra especie colonizara los continentes principales. En fecha más reciente, los cambios en la dieta que siguieron a la revolución neolítica proporcionan ejemplos fascinantes de la interacción entre cambio cultural y evolución biológica.

PAGINA OPUESTA: DONALD NAUSBAUM/*Corbis* (*arriba*), JEREMY HOMER/*Corbis* (*abajo*)/*American Scientist*

en parte a su influencia homogeneizadora en el comportamiento humano.

La perspectiva de la coevolución genético-cultural nos ayuda a entender el proceso por el cual la cultura es modelada por los imperativos biológicos mientras que, de forma simultánea, las propiedades biológicas son alteradas por la evolución en respuesta a la historia cultural. Hallamos ejemplos fascinantes de esta coevolución en la dieta humana. El reciente libro de Richard Wrangham, *Catching Fire: How Cooking Made Us Human* (Encender fuego: cómo cocinar nos hizo humanos), trata sobre los impactos de la domesticación del fuego y sus consecuencias en la calidad de nuestra alimentación.

Algunos expertos defienden un enfoque *memético* de esta y otras transiciones en la evolución de la dieta humana. La memética estudia la velocidad de dispersión de unidades de información cultural denominadas memes [*véase* "El poder de los memes", por Susan Blackmore, y "La teoría de los memes trivializa el desarrollo de la cultura", por Robert Boyd y Peter J. Richerson, ambos en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2000]. Este término fue acuñado por Dawkins como analogía al concepto más familiar de gen. Un método especial de hacer fuego que convierte al usuario en mejor adaptado para el consumo de ciertos recursos alimenticios correspondería a un meme. En general, este meme se dispersa en la población si resulta ventajoso para sus portadores. Los memes se transmiten entre los individuos mediante el aprendizaje social, un mecanismo que ha sido importantísimo —y todavía lo es— en la evolución de la dieta humana.



3. LOS UTILES LITICOS contribuyeron al cambio en la dieta de nuestros antepasados. Las herramientas de piedra afiladas permitían atravesar el pellejo de los animales cazados o la carroña y acceder a la carne. Cráneos y huesos podían aplastarse con dichos útiles, lo que facilitó el acceso a tejidos nutritivos como el tuétano o el cerebro.

En las líneas que siguen revisaremos la evolución biológica y cultural de las dietas de los homínidos. Concluiremos con tres ejemplos de evolución cultural que dieron lugar a cambios genéticos en *Homo sapiens*.

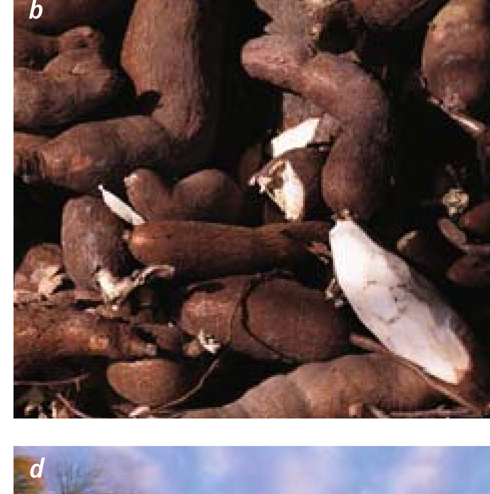
Primeros pasos en la sabana

La primera especie de homínido surgió hace entre diez y siete millones de años en el Mioceno superior africano. La antiguedad de *Sahelanthropus tchadensis*, el homínido más antiguo conocido, se ha datado entre 7,2 y 6,8 millones de años. Los homínidos probablemente evolucionaron desde un antepasado con rasgos simiescos, que trepaba los árboles, cuyos descendientes se volvieron gradualmente bípedos terrestres con un cerebro notablemente mayor. El panorama de la evolución humana ha cambiado de forma espectacular en los últimos años. Se han propuesto varios árboles genealógicos alternativos para los orígenes humanos.

El principal escenario ecológico para la evolución humana fue el clima cada vez más seco del Mioceno superior y Plioceno africanos. Los primeros homínidos respondieron al cambio climático con una combinación de adaptaciones biológicas y culturales que, juntas, potenciaron la supervivencia y reproducción en el entorno cambiante. Este complejo adaptativo probablemente incluyó un bipedismo cada vez más sofisticado, un comportamiento social complejo, la fabricación de herramientas, un aumento del tamaño corporal y un cambio gradual de la dieta. En parte, el cambio dietético fue posible gracias a los útiles líticos usados en la manipulación de los alimentos. Las herramientas de piedra más antiguas conocidas se remontan a hace 2,6 millones de años. Sin duda, las técnicas de fabricación de útiles líticos se mantuvieron y expandieron mediante el aprendizaje social; muy probablemente ocurrió lo mismo con los cambios en las estrategias recolectoras y la elección de alimentos.

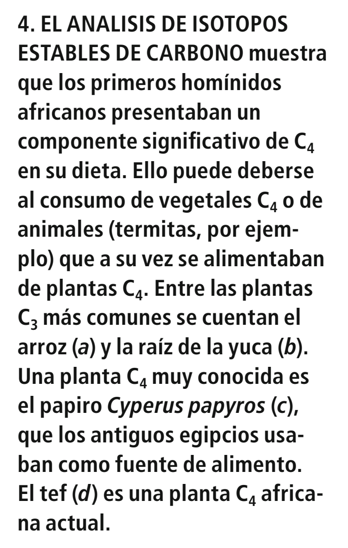
Las principales fuentes de información sobre paleodietas de los homínidos corresponden a los restos de homínidos fósiles y los yacimientos arqueológicos. Los fósiles bien conservados permiten el estudio de la morfología y el microdesgaste dentales, así como











4. EL ANALISIS DE ISOTOPOS ESTABLES DE CARBONO muestra que los primeros homínidos africanos presentaban un componente significativo de C_4 en su dieta. Ello puede deberse al consumo de vegetales C_4 o de animales (termitas, por ejemplo) que a su vez se alimentaban de plantas C_4. Entre las plantas C_3 más comunes se cuentan el arroz (*a*) y la raíz de la yuca (*b*). Una planta C_4 muy conocida es el papiro *Cyperus papyros* (*c*), que los antiguos egipcios usaban como fuente de alimento. El tef (*d*) es una planta C_4 africana actual.

MUSEO DE ANTROPOLOGIA, UNIVERSIDAD DE MISSOURI (*arriba*); LUCILLE REYBOZ (*a*), ANN JOHANSSON (*b*), WOLFGANG KAEHLER (*c*) Y FRANS LANTING (*d*)/CORBIS/*American Scientist*

el uso de técnicas paleodietéticas, como el análisis de isótopos estables de huesos, del colágeno dentinario y la apatita del esmalte. Se utiliza también la comparación de fósiles con especies actuales con dieta y morfología dental conocidas. Pero la morfología dental y el análisis del desgaste entrañan un problema: indican el tipo predominante de dieta, más que su variedad. Así pues, resulta de gran utilidad combinar información paleodietética de fuentes diversas. Los yacimientos arqueológicos pueden aportar información valiosa sobre restos de fauna, útiles y territorios ocupados por los homínidos, todos ellos factores relacionados con la dieta.

La atención más reciente se ha centrado en el análisis de isótopos estables de huesos y colágeno. Estas técnicas permiten comparar animales con diferentes tipos de dietas vegetales. Ello reviste importancia porque, dado que los restos de plantas rara vez fosilizan, suele exagerarse la proporción de animales en las dietas de los homínidos tempranos. El análisis de isótopos estables permite distinguir entre dietas basadas en plantas C_3 y dietas basadas en plantas C_4. C_3 y C_4 corresponden a dos rutas bioquímicas para la fijación de carbono en la fotosíntesis. Las plantas que utilizan la ruta fotosintética C_3 discriminan ^{13}C, lo que reduce su proporción isotópica $^{13}C/^{12}C$. En contraste, las plantas que utilizan la vía fotosintética C_4 discriminan menos ^{13}C; están, por tanto, “enriquecidas” con ^{13}C. Las plantas C_4 se hallan fisiológicamente mejor adaptadas que las C_3 a condiciones de sequía y temperaturas elevadas, así como a restricciones de nitrógeno. Por tanto, es probable que el clima seco de Africa aumentara la abundancia y diversidad de plantas C_4 con relación a las C_3.

La visión tradicional sobre los primeros homínidos los separaba en australopitecinos, considerados sobre todo frugívoros, y las especies del género *Homo* (*H. habilis y H. erectus*), considerados carroñeros o cazadores. Esta separación hipotética ha sido cuestionada por técnicas paleodietéticas que han resaltado la importancia de los cambios en la estructura de la dieta vegetal esbozada más arriba. Mientras que los monos ancestrales parece que continuaron explotando las plantas C_3, abundantes, en los medios boscosos, los australopitecinos ampliaron su dieta para incluir alimentos C_4, lo que, junto con el bipedismo, les permitió colonizar el hábitat africano, cada vez más abierto y estacional.

Esa diferencia emergente en la dieta contribuyó a la diversificación ecológica entre monos y homínidos, un paso crucial en la evolución humana. Las plantas C_4 recolectadas por los australopitecinos puede que incluyeran hierbas y juncos, aunque este punto es bastante controvertido. Cabe remarcar que el uso de animales como fuente de alimento puede resultar también en un patrón isotópico de tipo C_4, si las presas han consumido plantas C_4. Muchos investigadores creen que una proporción considerable de la dieta de los australopitecinos y los primeros *Homo* consistía en artrópodos (quizá termitas en buena parte), huevos de aves, lagartos, roedores y antílopes jóvenes, sobre todo durante la estación seca.



5. LA DOMESTICACION DEL FUEGO resultó clave en los cambios de la dieta de los homínidos. Aunque algunos ejemplos se remontan hasta hace 400.000 años, probablemente no empezó a utilizarse de forma habitual hasta hace entre 50.000 y 100.000 años, como muestran estas herramientas de silcreta tratadas al calor pertenecientes a estratos de entre 65.000 y 60.000 años de antigüedad en el yacimiento 5-6 de Pinnacle Point (PP5-6) en Africa.

KYLE S. BROWN, INSTITUTO DEL ORIGEN DEL HOMBRE (IHO)/*American Scientist*

Tamaño cerebral, comida y fuego

Los cambios progresivos en la dieta guardaban relación con el tamaño del cuerpo y la anatomía. Como ha señalado Robert Foley, de la Universidad de Cambridge, el incremento del tamaño corporal puede ampliar el nicho dietético al aumentar el área vital (se amplía el abanico de fuentes alimenticias) y elevar la tolerancia de alimentos de baja calidad. Un mamífero de gran tamaño puede permitirse subsistir con alimentos de peor calidad que un mamífero diminuto. Además, el aumento del tamaño corporal realza la movilidad y la retención de calor, y puede, por tanto, promover la capacidad de adaptación a climas más fríos. Todas estas posibilidades se desarrollaron en el linaje homínido.

En concreto, el origen de *Homo erectus*, hace alrededor de 1,8 millones de años, parece haber supuesto un gran cambio adaptativo en la evolución humana. *H. erectus* era mayor que sus predecesores y fue, en apariencia, la primera especie de homínido que emigró de Africa. También presentaba un grado de encefalización (tamaño del cráneo en relación con el del cuerpo) mayor que cualquier especie actual de primate no humano. El aumento de tamaño cerebral, a su vez, se asociaba a un cambio de dieta. Probablemente, el cerebro empezó

Los autores

Olli Arjamaa se doctoró en fisiología animal por la Universidad de Turku en 1983 y en medicina por la Universidad de Oulu en 1989. Es profesor en el Centro de Excelencia de Genética y Fisiología Evolutivas de la Universidad de Turku. Le interesa sobre todo la fisiología evolutiva de los péptidos natriuréticos. **Timo Vuorisalo** se doctoró en zoología ecológica por la Universidad de Turku en 1989. Es profesor de ciencias ambientales en el departamento de biología de la Universidad de Turku. Centra su investigación en la ecología evolutiva, la historia ambiental y la ecología urbana.

a crecer hace unos 2,5 millones de años, con una transición gradual de *Australopithecus* a *Homo*. Debido al mayor consumo energético del tejido cerebral, la evolución del cerebro humano, cada vez más voluminoso, ha tenido implicaciones importantes para las necesidades nutricionales de la especie homínida. Según la hipótesis del "tejido costoso" propuesta en 1995 por Leslie Aiello, del Colegio Universitario de Londres, y Pete Wheeler, de la Universidad John Moores de Liverpool, parte de los altos costes de los voluminosos cerebros humanos la sustentan dietas ricas en energía y nutrientes, que suelen incluir carne.

El uso creciente de las plantas C_4 fue seguido por un aumento gradual en el consumo de carne, proveniente de carroña o de caza. Al incremento de la disponibilidad de carne contribuyeron varios factores. En primer lugar, empezaron a extenderse los ecosistemas de sabana con varias características modernas hace alrededor de 1,8 millones de años. Ello benefició a los ungulados de Africa oriental, que aumentaron en número y en diversidad de especies. Los grandes depredadores como *H. erectus* contaron así con más posibilidades de obtener caza y carroña. Parece que la dieta de *H. erectus* contenía más carne que la de los australopitecinos y la de los primeros *Homo*. *H. erectus* probablemente conseguía restos de mamíferos mediante la caza o el carroñeo. Las pruebas arqueológicas muestran que *H. erectus* usaba útiles líticos y a buen seguro tenía una primitiva economía cazadora recolectora. Las herramientas de piedra afiladas revestían importancia porque podían atravesar el pellejo y llegar a la carne; también permitían acceder a tejidos como la médula o el cerebro. El mayor acceso a la comida animal parece haber proporcionado los niveles de ácidos grasos necesarios para sustentar la pronta evolución del cerebro homínido.

Según Richard Wrangham, la domesticación del fuego tuvo una gran influencia en la dieta de nuestros antepasados. El fuego podía usarse en la caza cooperativa y para cocinar carne y vegetales. Según los registros fósiles de homínidos, ya se cocinaban alimentos hace alrededor de 1,9 millones de años, aunque las pruebas del uso controlado del fuego aparecen en el registro arqueológico sólo desde hace 400.000 años. El fuego probablemente empezó a utilizarse de forma habitual hace entre 50.000 y 100.000 años. El uso corriente del fuego tuvo un gran impacto en la dieta de *H. erectus* y en especies posteriores, entre ellas *H. sapiens*.

La cocción de los tubérculos de la sabana y otros vegetales causa su reblandecimiento, incrementa su valor energético y la biodisponibilidad de nutrientes. El almidón de raíces y tubérculos crudos no es absorbido por el intestino, por lo que pasa a través del cuerpo como un carbohidrato no digerible. La cocción aumenta las cualidades nutritivas de los tubérculos, ya que permite aprovechar mejor la energía de los carbohidratos. Asimismo, reduce el riesgo de infecciones microbianas. El uso del fuego amplió, pues, de forma notable el abanico alimentario de los primeros humanos. No resulta sorprendente que la expansión de nuestra especie por todos los continentes coincidiera con la domesticación del fuego.

En términos relativos, el consumo de carne parece haber tocado techo con nuestra especie hermana *H. neanderthalensis*. Según los trabajos de Matt Sponheimer, de la Universidad

	Paleolítico	Adultos jóvenes finlandeses
Proteínas	30 %	17 %
Carbohidratos	35 %	49 %
Grasas	35 %	32 %
Alcohol	0 %	2 %

6. LA REVOLUCION DE LOS CARBOHIDRATOS comenzó con la domesticación de plantas y animales hace unos 12.000 años. Las dietas anteriores al Neolítico difieren de las que consume hoy la mayoría. La contribución de la proteína a la ingesta calórica (en el plato finlandés de la fotografía, el salmón) declinó de forma notable. En su sustitución llegaron carbohidratos como la patata. Ello puede haber conducido a un aumento de las copias del gen humano de la enzima amilasa salival.

RICHARD WAREHAM FOTOGRAFIE/ALAMY/*American Scientist*

Rutgers, y Julia A. Lee-Thorp, de la de Ciudad del Cabo, los neandertales se alimentaban de animales en una gran proporción. Los yacimientos de ese homínido están plagados de restos de mamíferos de gran tamaño y medianos. Probablemente los cazaban, o recolectaban sus restos. Quizá preferían cazar presas pequeñas. Y en las zonas septentrionales colonizadas por neandertales seguramente no había competencia por los cadáveres congelados de animales. Controlar el fuego, sin embargo, permitió a los neandertales, y a los humanos arcaicos modernos, descongelar y consumir esos restos.

La revolución de los carbohidratos

La revolución agrícola o neolítica, el cambio gradual hacia la domesticación de plantas y animales, comenzó hace unos 12.000 años. Para nuestra especie, esta innovación cultural significó, entre otras muchas cosas, un aumento notable del porcentaje de carbohidratos en la dieta. En las sociedades cazadoras recolectoras, los cereales suponían alrededor del 35 por ciento de la ingesta de energía; en las sociedades agricultoras modernas, la mitad (*véase en la figura 6* el caso de los jóvenes finlandeses). La revolución neolítica incluyó también la domesticación de mamíferos, que en condiciones favorables garantizaba una constante aportación de carne y otras fuentes de proteína animal.

Aunque el fuego probablemente desempeñó un papel clave en el aprovechamiento inicial de los carbohidratos, el gran cambio dietético derivado de la domesticación de las plantas tiene su origen en la interacción entre cambio cultural y evolución biológica. Los carbohidratos de los alimentos dulces son muy energéticos y, por tanto, vitales para los humanos. En el entorno de las poblaciones paleolíticas de cazadores-recolectores, los carbohidratos escaseaban, por lo que revestía suma importancia encontrar y detectar alimentos de ese tipo. Cuando se ingieren, los polímeros de gran tamaño como el almidón son en parte hidrolizados en la boca por la enzima amilasa y segmentados en azúcares, cuyo sabor dulce puede haber operado a modo de señal identificativa de fuentes de alimentos nutritivos. (Cabe señalar que la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* percibe como dulces los mismos compuestos que nosotros.) Más tarde, durante el Neolítico, los humanos adoptaron una dieta rica en almidón; la función de la enzima amilasa en el tracto digestivo llegó a ser incluso más importante para descomponer el almidón.

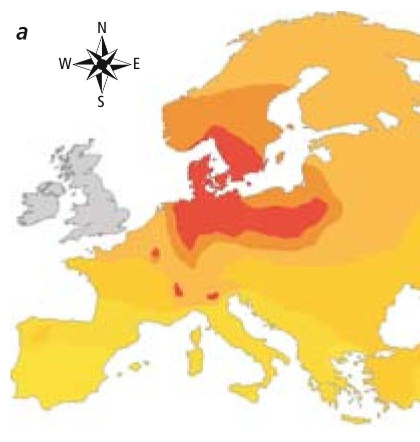
La amilasa salival constituye un desarrollo reciente. Se originó a partir de un gen de amilasa pancreática: un duplicado del gen ancestral desarrolló especificidad salival por separado en roedores y en primates, lo que resalta su importancia en la digestión. Además, su biología molecular arroja nueva luz sobre el modo en que la evolución ha hecho uso de las "variaciones en el número de copias" (VNC, que incluyen eliminación, inserción, duplicación y variantes complejas multisitio) como fuentes de variación genética y fenotípica; se pensaba que los "polimorfismos de nucleótido simple" (PNS) desempeñaban en exclusiva esta función. Las VNC pueden implicar también ganancias o pérdidas complejas de secuencias homólogas en múltiples sitios del genoma; las variantes estructurales constan de millones de nucleótidos con una heterogeneidad en el tamaño que varía entre kilobases y megabases.

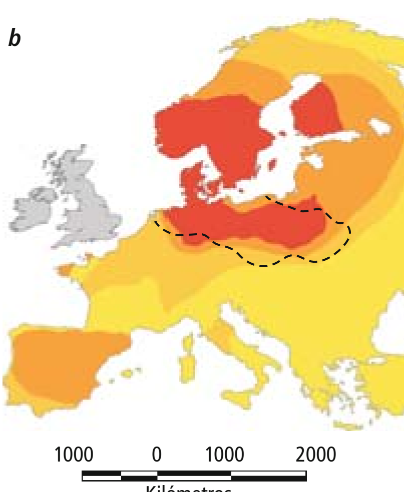
Los análisis de la variación en el número de copias en el gen humano de la amilasa salival (*Amy1*) revelaron que el número de copias guardaba correlación con el nivel de proteína y que las poblaciones humanas aisladas con una dieta rica en almidón presentaban más copias de *Amy1*. Además, el número de copias y la dieta no tenían un origen común. Las dietas locales crearon una fuerte selección positiva en la variación del número de copias de la amilasa, barrido selectivo que puede haber coincidido con el cambio dietético que se produjo durante los primeros estadios de la agricultura en nuestra especie. Es interesante apuntar que la variación en el número de copias parece haber aumentado durante la evolución del linaje humano: los niveles de proteína salival son entre seis y ocho veces mayores en los humanos que en los chimpancés y bonobos, animales esencialmente frugívoros que ingieren poco almidón en comparación con los humanos.

Transición a los lácteos

Hallamos un ejemplo clásico de la coevolución genético-cultural en la persistencia de la lactasa en humanos adultos. La leche contiene lactosa, un azúcar que debe ser digerido por la enzima lactasa antes de poder ser absorbido por el intestino. La capacidad de los adultos para digerir la leche (tolerancia a la lactosa) es común en los habitantes de la Europa septentrional, donde se supone que las antiguas poblaciones han usado productos lácteos como fuente de energía para sobrevivir a los gélidos y oscuros inviernos. En la Europa meridional y gran parte de Asia, en cambio, el consumo de leche superada la infancia provoca a menudo trastornos gastrointestinales.

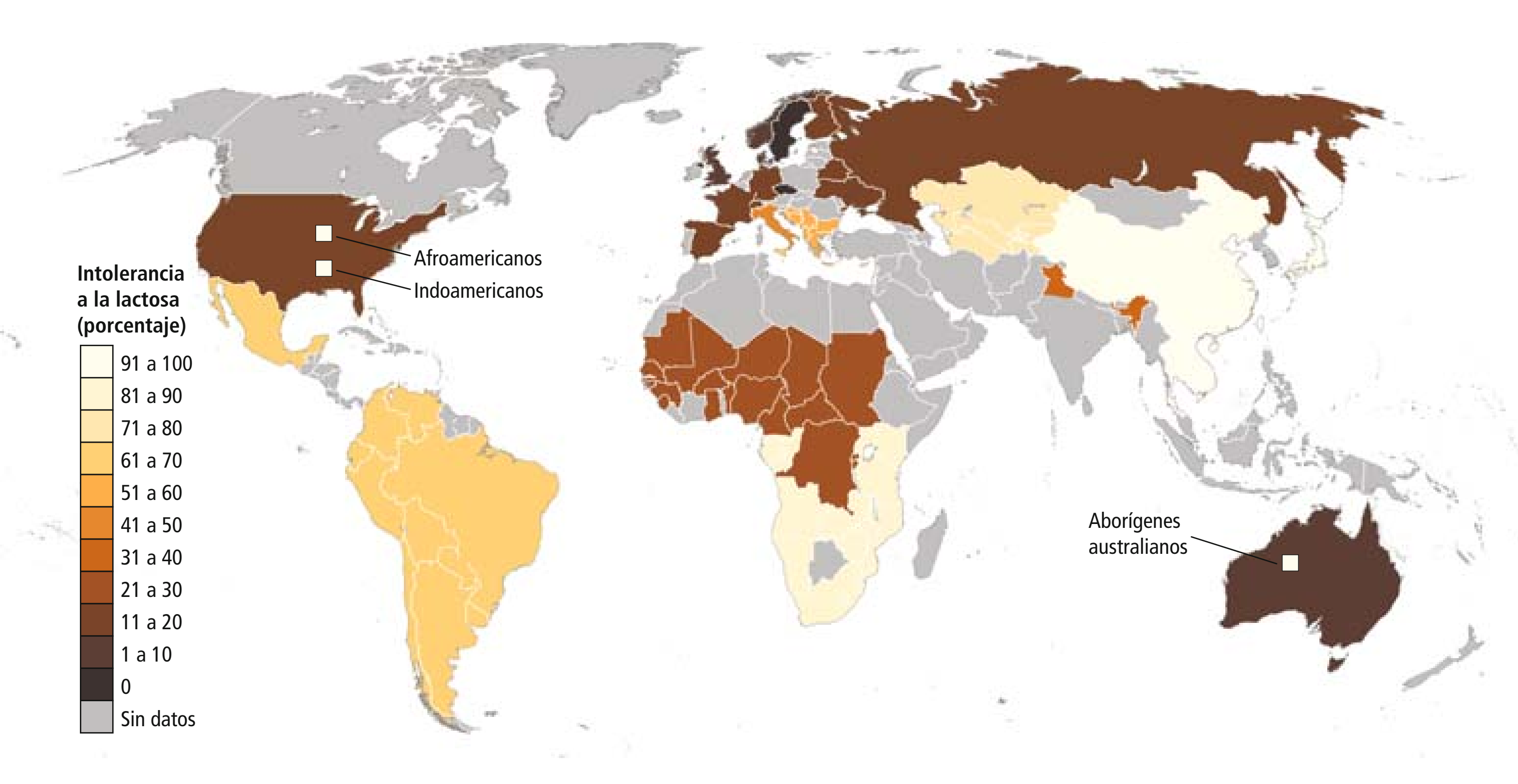
Si el intestino no logra descomponer la lactosa en glucosa y galactosa, debido a la fal-





7. COMPARACION GEOGRAFICA, llevada a cabo por Albano Beja-Pereira y sus colaboradores, entre la diversidad del gen de la leche en el ganado, la tolerancia a la lactosa en los humanos contemporáneos y la ubicación de los yacimientos de cría de ganado del Neolítico. El rojo en *a* muestra dónde se dan, en el ganado, la mayor singularidad de genes de la leche y diversidad alélica. En *b* se muestra la persistencia de la lactasa en los europeos contemporáneos. Cuanto más oscuro es el color, más elevada la frecuencia del alelo de persistencia de la lactasa. La línea discontinua en *b* muestra el área geográfica donde surgió la primera cultura trashumante en el Neolítico.

ADAPTADO DE BEJA-PEREIRA ET AL. 2003/*American Scientist*



8. LA INTOLERANCIA A LA LACTOSA en los humanos adultos constituye la regla más que la excepción, aunque su prevalencia podría estar disminuyendo conforme se extiende el polimorfismo nucleótido simple que provoca la persistencia de la lactasa. Nótese la amplia variación de la intolerancia a la lactosa en distancias geográficas cortas. Sobre todo en culturas africanas, la prevalencia de la producción lechera guarda una estrecha correlación con la tolerancia a la lactosa. Las áreas grises indican zonas para las que no se dispone de datos.

MAPA ADAPTADO DE WIKIMEDIA COMMONS/*American Scientist*

ta de lactasa floricín hidrolasa (LPH, por sus siglas en inglés, enzima que se aloja en las vellosidades de los enterocitos del intestino delgado), el proceso bacteriano de la lactosa provoca diarrea, hinchazón y flatulencia que pueden derivar, en los niños, en una deshidratación mortal. Por otro lado, la leche constituye para los adultos una fuente de energía líquida y rica sin contaminación bacteriana, que potencia la supervivencia y el grado de adaptación. Por tanto, en el pasado, el fenotipo de la persistencia de la lactasa indudablemente incrementó el éxito reproductivo de sus portadores.

Según descubrimientos recientes de la biología molecular, un polimorfismo de nucleótido simple que hace que la lactasa sea persistente en poblaciones aisladas constituye una de las señales más poderosas de selección hallada hasta ahora en un gen. La persistencia de la lactasa apareció de forma independiente hace entre 10.000 y 6000 años en Europa y Oriente Medio, dos zonas con un historial diferente de adaptación al consumo de leche. La prueba histórica más antigua del uso de ganado como proveedor de leche viene del antiguo Egipto y Mesopotamia: se remonta al cuarto milenio a.C. Todavía hoy, existen extensas zonas de Africa central y el este asiático sin tradición de ordeño; gran parte de la población adulta de estos países carece de la capacidad fisiológica de absorber lactosa. Los antiguos romanos no bebían leche; ello se refleja hoy en la fisiología de sus descendientes en el área mediterránea.

La primera prueba de los PNS como causa de la persistencia de la lactasa llegó de un grupo de familias finlandesas. Un análisis del haplotipo de 9 familias extensas reveló que una variante de ADN (C/T_{-13910}) alojada en el elemento potenciador arriba del gen de la lactasa guardaba una estrecha relación con la intolerancia a la lactosa. Asimismo, la observación de esta variante en poblaciones de parentesco lejano sugirió que ésta era muy antigua. Más tarde se demostró que el alelo había surgido por separado en dos poblaciones circunscritas geográficamente en los Urales y en el Cáucaso, la primera vez hace entre 12.000 y 5000 años y la segunda entre 3000 y 1400 años. Aun así, las poblaciones de Arabia Saudí con una alta prevalencia de persistencia de la lactasa presentan dos variantes introducidas en conexión con la domesticación del camello arábigo hace unos 6000 años. En Africa, un barrido selectivo en la persistencia de la lactasa produjo tres nuevos PNS hace unos 7000 años en las poblaciones tanzana, keniata y sudanesa; ello refleja una evolución convergente durante un tipo similar de domesticación animal y de consumo de leche en los adultos.

Todos esos hechos indican que, en distintas épocas, ha operado una fuerte presión de selección positiva en poblaciones aisladas hacia la introducción de la tolerancia a la lactosa, lo que ha ocurrido por medio de varias mutaciones independientes, que supusieron una adaptación a diferentes tipos de cultura láctea. La persistencia de la lactasa prácticamente no existía en los primeros agricultores europeos, según el análisis de los esqueletos humanos neolíticos, pero cuando empezó la producción lechera en el Neolítico superior, la frecuencia de los alelos de la persistencia de lactasa incrementó bajo una intensa selección natural. Parece que el cambio cultural hacia la producción de leche condujo a la rápida evolución de la tolerancia a la lactosa, una de las pruebas más contundentes de la coevolución genético-cultural en los humanos modernos. En otras palabras, el meme para el ordeño tenía variantes locales, que se expandieron rápidamente debido a los efectos positivos que tenían en sus portadores.

Debemos tener en cuenta, sin embargo, que la transcripción de un gen depende de una regulación compleja. Así ocurre en la variante C/T_{-13910}: contiene un elemento potenciador por medio del cual varios factores de transcripción contribuyen a la regulación en el intestino del gen de la lactasa. Además, la tolerancia a la lactosa en los humanos y las frecuencias de los genes de la proteína de la leche en el ganado también parecen haber coevolucionado. Se estudió la variación geográfica de los genes que codifican las proteínas más importantes de la leche en varias razas de ganado europeas y la prevalencia de la tolerancia a la lactosa en Europa: la alta diversidad de genes de la leche presentó una correlación geográfica con la tolerancia a la lactosa de los europeos modernos y con las localizaciones de los sitios de cría de ganado en Europa (*véase la figura 7)*. Esta correlación sugiere que se ha producido una coevolución genético-cultural entre el ganado y la cultura humana hacia rebaños de mayor tamaño y variedad genética; ello ha resultado en una mayor producción de leche y una composición de proteínas lácteas más apropiada para la nutrición humana. En el futuro, sabremos todavía más sobre la evolución geográfica de la persistencia de la lactasa, gracias a la posibilidad de secuenciar rápidamente el ADN de un gran número de individuos que albergan polimorfismos ligados a la tolerancia a la lactosa que provocan trastornos gastrointestinales tras la ingestión de lactosa.

Seguimos evolucionando

Como hemos visto, los cambios de la dieta basados en la cultura (memes) han generado repetidamente presiones selectivas en la evolución biológica humana. Así lo demuestra el polimorfismo de nucleótido simple de la persistencia de la lactasa y la variación en el número de copias de la amilasa. Estos barridos selectivos tuvieron lugar hace entre 10.000 y 6000 años, cuando comenzó la domesticación de plantas y animales; ello marcó la transición del Paleolítico al Neolítico. Mucho antes, los cambios genéticos estaban asociados a las variaciones en la dieta de los australopitecinos y *H. erectus*.

¿Qué ocurrirá en el futuro? ¿Podemos ver alguna presión de selección en los *loci* de proclividad a los trastornos dietéticos? La respuesta parece ser afirmativa. Se ha sugerido que el riesgo de diabetes de tipo II (DT2) constituye un blanco de la selección natural en los humanos, ya que afecta fuertemente al metabolismo y la producción de energía, y, por tanto, a la supervivencia y salud humanas. Estudios de asociación integral del genoma sin hipótesis previas han revelado una variante del gen del factor de transcripción 7-like (TCF7L2) implicado en el riesgo de sufrir DT2. Más tarde, un estudio genético similar de la enfermedad realizado en finlandeses elevó a 10 el número de variantes cerca de *TCF7L2*. Cuando se analizaron con mayor detalle los efectos de las variantes de *TCF7L2* en la DT2, se identificó una nueva variante del gen que se ha seleccionado en poblaciones europeas, del este asiático y el oeste africano. Curiosamente, esta variante sugería una relación con el índice de masa corporal y con las concentraciones de leptina y grelina, hormonas que regulan la sensación de hambre y que se originaron durante la transición de la cultura paleolítica a la neolítica.

En apoyo a la idea de que la selección constituye un proceso en curso en la adaptación fisiológica humana, el análisis de muestras de poblaciones humanas de todo el mundo mostró que los *loci* asociados con la proclividad a la DT2 han experimentado una selección positiva reciente; el riesgo de sufrir diabetes de tipo I, en cambio, apenas mostró indicios de hallarse sujeto a la selección natural.

En un futuro cercano, los barridos integrales del genoma para selecciones positivas recientes arrojarán luz sobre la coevolución entre el antiguo genoma y la dieta en poblaciones distintas, proyectándola a problemas de la calidad de la nutrición actual. Como se ha sugerido aquí, es probable que esta comprensión más honda añada complejidad al simple y extendido enfoque que nos ve como "genes de cazadores-recolectores alimentándose de comida rápida".

Bibliografía complementaria

HOMININ PALEODIETS: THE CONTRIBUTION OF STABLE ISOTOPES. M. Sponheimer y J. Lee-Thorp en *Handbook of Paleoanthropology*, vol I: *Principles, Methods and Approaches*, dirigido por W. Henke y I. Tattersall, págs. 555-585. Springer; Berlín, 2007.

INDEPENDENT INTRODUCTION OF TWO LACTASE-PERSISTENCE ALLELES INTO HUMAN POPULATIONS REFLECTS DIFFERENT HISTORY OF ADAPTATION TO MILK CULTURE. N. S. Enattah, T. G. K. Jensen, M. Nielsen et al. en *American Journal of Human Genetics*, vol. 82, págs. 57-72; 2008.

FIRE IN THE EARTH SYSTEM. D. M. J. S. Bowman, J. K. Balch, P. Artaxo et al. en *Science*, vol. 324, págs. 481-484; 2009.

SIGNALS OF RECENT POSITIVE SELECTION IN A WORLDWIDE SAMPLE OF HUMAN POPULATIONS. J. K. Pickrell, G. Coop, J. Novembre et al. en *Genome Research*, vol. 19, págs. 826-837; 2009.

CATCHING FIRE: HOW COOKING MADE US HUMAN. R. Wrangham. Basic Books; Nueva York, 2009.

HOW CULTURE SHAPED THE HUMAN GENOME: BRINGING GENETICS AND THE HUMAN SCIENCES TOGETHER. K. N. Laland, J. Odling-Smee y S. Myles en *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, págs. 137-148; 2010.


REDES INALA

MBRICAS INSTANTANEAS

Las redes inalámbricas independientes de una estructura fija facilitarían una conectividad permanente desde cualquier lugar y en cualquier situación

Michelle Effros, Andrea Goldsmith y Muriel Médard

En esta era de facebook, twitter o iPhone parece fácil dar por sentada la posibilidad de conectarnos en todo momento con cualquier parte del mundo. Sin embargo, es precisamente en aquellas circunstancias en que la infraestructura de comunicaciones falla cuando pueden éstas resultar decisivas. En Haití, los teléfonos vía satélite facilitados por los organismos de ayuda constituyeron el principal medio de comunicación durante los días posteriores al trágico terremoto de principios de 2010. También un corte de luz ordinario puede inutilizar la red de telefonía móvil, con lo que nuestro principal instrumento de comunicación en caso de emergencia se vería reducido a mero pisapapeles luminoso.

En tales situaciones, una opción cada vez más atractiva la representan las "redes *ad hoc*": redes que se conforman por sí solas dondequiera que varios teléfonos móviles (u otros dispositivos inalámbricos) programados para ello se encuentren mutuamente al alcance. Cada aparato de la red actúa simultáneamente como transmisor y como receptor y, lo que es fundamental, como repetidor para los dispositivos sitos en las proximidades. La comunicación entre dos aparatos lejanos (es decir, fuera del rango de alcance mutuo) se efectúa mediante dispositivos intermedios, que se pasan en cadena los mensajes. Es decir, la infraestructura encargada de transmitir la información no es fija, sino que está formada por una red cuyos nodos son los emisores y receptores de la misma.

La asistencia en caso de catástrofe no es sino una de las múltiples aplicaciones potenciales de las redes ad hoc. Redes que pueden resultar útiles en lugares donde la construcción de una infraestructura fija sea demasiado lenta, complicada o costosa. El ejército ha inverti-

PAUL WEARING

CONCEPTOS BASICOS

- Las redes inalámbricas ad hoc no requieren ninguna infraestructura fija. La información se transmite de un aparato a otro y genera así una red dinámica de conexiones.
- Dichas redes pueden emplearse en aquellos lugares donde construir una infraestructura de telefonía móvil al uso se mostrase excesivamente engorroso o caro; piénsese en áreas remotas o en zonas de combate.
- Dado que la estructura de una red ad hoc cambia sin cesar, deben emplearse procedimientos innovadores para evitar la pérdida de información y mitigar las interferencias.



LLAMADAS PERDIDAS. Los desastres como el terremoto de Haití suprimen las comunicaciones. Pese a carecer de infraestructura fija, las redes ad hoc podrían conectar a las víctimas con los cooperantes y con el mundo exterior.

do grandes recursos en el diseño de sistemas de ese tipo para comunicaciones tácticas. Las redes ad hoc permitirían también la conexión a Internet en poblaciones o barrios carentes de banda ancha.

Si bien las redes ad hoc llevan en desarrollo más de tres decenios, sólo recientemente los avances en teoría de redes han hecho posible la aparición de los primeros ejemplos a gran escala. En San Francisco, la empresa Meraki Networks provee de conexión a Internet a 400.000 residentes a través del proyecto "Free the Net", basado en la técnica de las redes ad hoc. Los componentes Bluetooth para teléfonos móviles, consolas de videojuegos u ordenadores portátiles también emplean conexiones ad hoc para facilitar la comunicación entre aparatos sin necesidad de cables ni de configuración explícita. Y el estudio científico de ecosistemas remotos e inhóspitos (como la selva o los fondos oceánicos) se ha visto beneficiado del despliegue de redes ad hoc que recogen y transmiten datos sin más infraestructura que un conjunto de sensores inalámbricos de baja potencia.

Aún habrán de superarse algunos obstáculos de importancia antes de que veamos las redes ad hoc convertidas en algo cotidiano. No obstante, se están consiguiendo progresos significativos en varios frentes.

Una red móvil

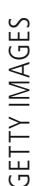
Las redes ad hoc son todavía una rareza. Para entender por qué, debemos analizar en primer lugar las diferencias entre ellas y otras técnicas inalámbricas, como las empleadas en los teléfonos móviles o los dispositivos Wi-Fi. Cuando realizamos una llamada con un móvil, sólo son inalámbricas las transmisiones entre cada aparato individual y la torre repetidora más cercana. Pero todos los repetidores se hallan fijos y la comunicación entre ellos tiene lugar a través de vastas redes de cableado. Las redes inalámbricas de área local, como una red Wi-Fi, se basan en el uso de antenas fijas y comunicaciones por cable.

Esta manera de proceder presenta ventajas e inconvenientes. Toda transmisión de información consume energía. Las conexiones inalámbricas al uso ahorran energía en los dispositivos alimentados por baterías (ya sean teléfonos móviles, ordenadores portátiles, u otros), dado que la mayor parte del peso de las comunicaciones se la lleva una infraestructura fija conectada a la red eléctrica.

Por otro lado, el ancho de banda inalámbrico es un recurso limitado. Los sistemas inalámbricos comunes se benefician de un gran ancho de banda gracias a que envían por cable buena parte de la información. Así pues, el uso de infraestructuras fijas posibilita la construcción de redes de gran tamaño que, en condiciones normales, operan con alta fiabilidad.

Sin embargo, las redes fijas son vulnerables ante los cortes de energía o ante cualquier otra avería que afecte a la red central. En tales circunstancias, la comunicación falla aunque cada teléfono o cada portátil de la zona sigan funcionando. Por el contrario, las redes ad hoc son excepcionalmente resistentes. Si un dispositivo móvil se queda sin energía o se apaga, los demás elementos modifican sus conexiones mutuas para compensar al elemento desaparecido. Es decir, las redes se ajustan y "sanan" por sí solas a medida que los aparatos entran y salen de la red.

No obstante, esa capacidad de reparación autónoma tiene un precio. En primer lugar, la información ha de enviarse mediante pro-



tocolos que posibiliten la reconstrucción de un mensaje, aunque desaparezcan, durante el tránsito, algunos de los enlaces entre el remitente y el destinatario. Además, el sistema debe estar capacitado para hallar el mejor modo de que un mensaje llegue a destino, pese a que el emisor no cuente con ningún método para saber dónde se halla el receptor. Por último, la red ha de hacer frente a las interferencias generadas por múltiples aparatos que transmiten simultáneamente mensajes cruzados.

Estrategias de distribución

Son varios los impedimentos que deben superarse para dirigir la información a través de una red cuya estructura cambia constantemente. En la telefonía móvil, por ejemplo, una red de cableado central y fija rastrea la ubicación general de cada aparato concreto; de esta manera se logra que el mensaje de un usuario llegue directamente a destino.

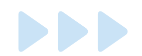
En cambio, los dispositivos de las redes ad hoc deben determinar por sí mismos cuál es en cada momento el mejor procedimiento para distribuir la información. Cada instrumento queda limitado por su propia potencia de cálculo, su capacidad de memoria y el alcance de la comunicación: ningún aparato aislado puede admitir ni procesar toda la información que, en una red usual, estaría a disposición de los ordenadores centrales.

Consideremos el siguiente ejemplo. Supongamos que nos hallamos en una metrópoli de varios millones de habitantes y necesitamos contactar con un amigo que se encuentra en algún lugar desconocido de la misma. En esa urbe imaginaria, toda la infraestructura de comunicaciones es inalámbrica y sus transmisores están instalados en los techos de los taxis. El dispositivo de cada taxi cuenta con un alcance de un kilómetro, por lo que varios taxis deberán transmitirse la información de unos a otros hasta que el mensaje alcance a nuestro amigo. Taxis próximos mantienen sus receptores conectados entre sí; mas, a medida que circulan por el denso tráfico de la ciudad, dos taxis cualesquiera pueden perder la conexión en cualquier momento (y de modo impredecible) en cuanto se alejen más de un kilómetro. Nuestra llamada deberá "saltar" a lo largo de la ciudad a través de una red de constitución inestable, hallar a nuestro amigo y hacerle llegar el mensaje.

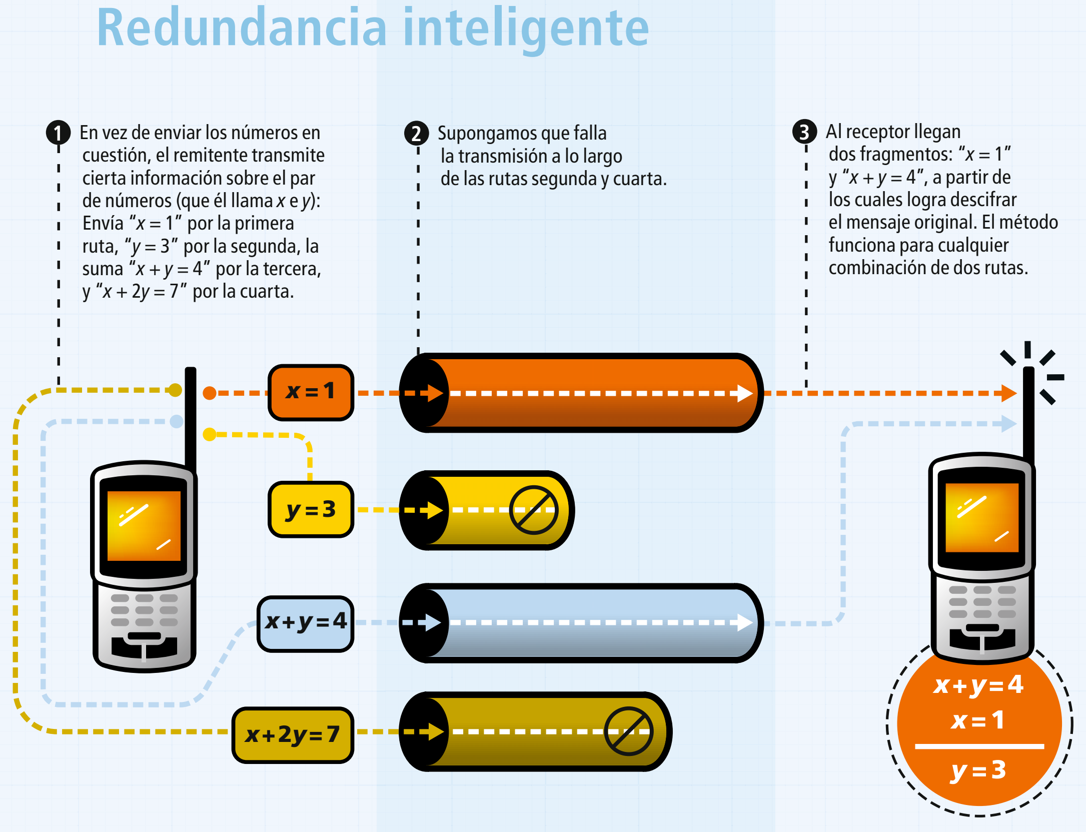
El problema, de difícil solución para un mensaje y una red pequeña, adquiere complejidad creciente con el número de aparatos y el de mensajes. Para que la técnica resulte útil, habrá de funcionar eficientemente con independencia de la extensión de la red.

Para abordar esa cuestión se han desarrollado estrategias muy diversas. La directriz que todas comparten estriba en preguntar en

En San Francisco, unos 400.000 residentes acceden a Internet gracias a las redes ad hoc.



En una red inalámbrica ad hoc, cualquiera de las rutas por las que transita la información puede fallar. Por tanto, el remitente debe trocear la misiva de algún modo que permita su reconstrucción con independencia de cuáles sean las rutas interrumpidas. En este ejemplo, el mensaje está formado por los números 1 y 3. Hay cuatro rutas posibles, cada una de las cuales sólo cuenta con una probabilidad del 50 % de funcionar correctamente. La opción más simple, enviar "1" por dos rutas y "3" por las otras dos, podría desembocar en una situación en la que fallasen las dos rutas por las que se transmite el número 1 o bien las dos asociadas al número 3, truncando el mensaje. Otro procedimiento (*diagrama*) garantiza la recepción.

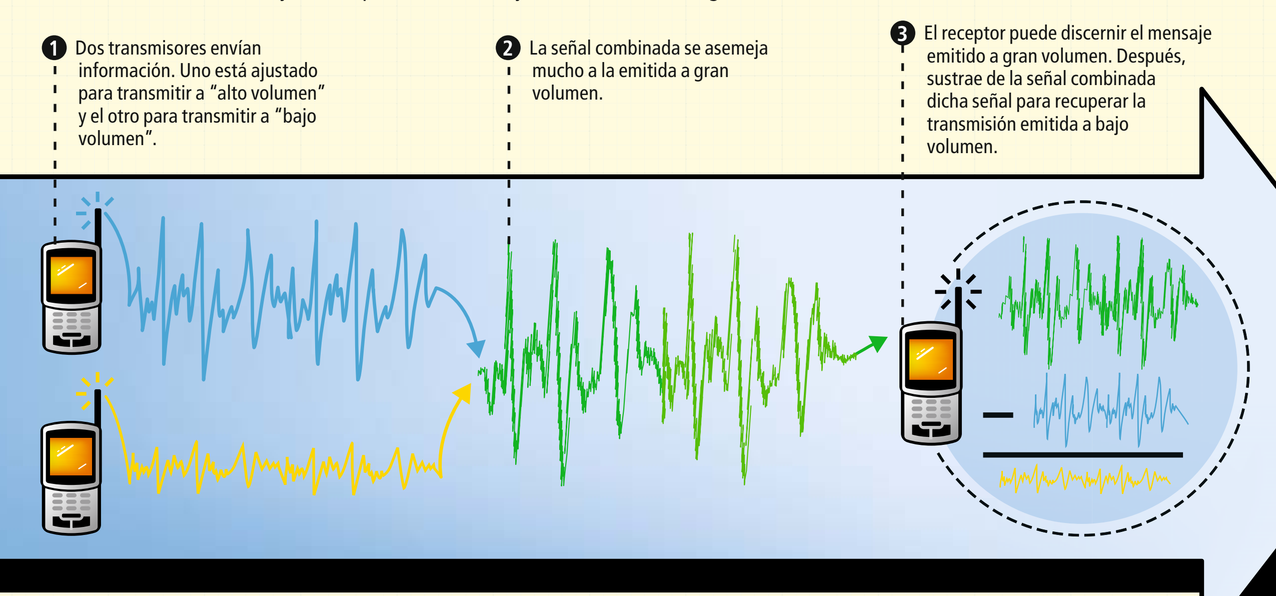


HEADCASE DESIGN



Volumen variable contra las interferencias

Los circuitos inalámbricos ad hoc deben hacer frente a problemas de interferencia graves; cuando varios aparatos transmiten simultáneamente, resulta difícil extraer, del ruido de fondo, un flujo de datos diferenciado. Una estrategia adoptada consiste en que los aparatos envíen sus señales con intensidades marcadamente diferentes. Este método arroja buenos resultados en el caso de dos transmisores y un receptor. Su extensión a un número mayor de dispositivos constituye un reto de la investigación en curso.



HEADCASE DESIGN

muchas direcciones a la vez: cada dispositivo consulta con sus vecinos a fin de comprobar qué aparatos cercanos hay; a su vez, esos dispositivos hacen lo propio con sus vecinos, y así sucesivamente hasta que nuestro amigo recibe el mensaje. La respuesta de nuestro amigo puede volver por la misma ruta o bien buscar otro itinerario. De ese modo, cada aparato intermedio contribuye a crear una lista de rutas disponibles entre nosotros y nuestro amigo, posibilitando que el mensaje llegue a destino, aun cuando nuestro aparato en concreto desconozca la ubicación del receptor.

Como la red se encuentra en constante movimiento, los aparatos deben iterar una y otra vez el proceso de preguntas y respuestas para mantener actualizada la lista de rutas disponibles.

Por un lado, resulta útil enviar la información por varios caminos a la vez, ya que así aumenta la probabilidad de que el mensaje llegue a su destinatario. La cuestión reside en cuál ha de ser el grado de redundancia del sistema. Un caso extremo vendría dado por una red que enviase el mensaje completo a través de todas las rutas posibles. De esta manera aumentan las posibilidades de éxito, pero obrar así con cada mensaje no tardaría en desbordar la red.

En el extremo opuesto tenemos la posibilidad de fragmentar la información y enviar por rutas diferentes cada uno de los fragmentos. Semejante procedimiento hace un menor uso de los recursos de la red, pero muchos bits podrían perderse durante el trayecto y el destinatario sólo recibiría un mensaje incompleto.

La "codificación en red" constituye una estrategia intermedia. Consiste en fragmentar un mensaje, reelaborar adecuadamente la información contenida en los fragmentos y, sólo entonces, enviar la "información ya trabajada" a través de múltiples rutas. Todo ello ha de hacerse de manera tal que, aunque algunos fragmentos desaparezcan por el camino, el mensaje original pueda ser reconstruido en la terminal del destinatario (*véase el recuadro* "Redundancia inteligente").

Una de las cuestiones relativas a la técnica de codificación en red es decidir el número de rutas por las que enviar el mensaje. El aumento del número de rutas comporta la reducción de los efectos derivados de que alguna de ellas falle, pero también requiere que un mayor número de aparatos participe en la transmisión de un mensaje. Esta estrategia reparte el peso de la comunicación entre más participantes y limita así la carga para cada uno de ellos, si bien requiere una mayor coordinación.

Cuantos más aparatos empiecen a transmitir (ya sea en apoyo de una o de más conversaciones), resultará mayor la probabilidad de interferencias. Al igual que nos cuesta entender algo cuando demasiadas personas hablan a la

Los autores

Michelle Effros, Andrea Goldsmith y **Muriel Médard** son colaboradores desde hace años. Effros enseña ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología de California. Goldsmith, docente de la misma materia en la Universidad de Stanford, es cofundador de Quantenna Communications, que desarrolla técnicas de conexión inalámbrica. Médard pertenece al departamento de informática e ingeniería eléctrica del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

vez, es igualmente difícil para un aparato inalámbrico recuperar la información cuando en las cercanías se desarrollan otras transmisiones. Esos problemas son especialmente graves en las redes inalámbricas ad hoc, pues no hay ningún "moderador" central que coordine a los participantes.

Existen dos maneras de controlar las interferencias en una red inalámbrica. La primera es evitar el conflicto: si las transmisiones escasean, la probabilidad de que dos mensajes interfieran es pequeña. A tal efecto, cada aparato divide la información en pequeños fragmentos que transmite sólo a impulsos cortos. Como no existe coordinación entre vecinos, resulta improbable que dos de ellos transmitan al mismo tiempo, por lo que este procedimiento crea menos interferencias que las que generaría un envío de información en flujos lentos y continuos. De hecho, los protocolos más comunes para redes inalámbricas de ordenadores personales se basan en este tipo de funcionamiento por impulsos cortos.

En el otro procedimiento, dos transmisores envían simultáneamente la información a un receptor, si bien uno ha de transmitirla con mucha mayor intensidad que el otro. Cuando una persona habla muy alto al tiempo que otra susurra, lo normal es se perciba sin dificultad el mensaje de quien habla alto. Si, además, disponemos de una grabación de audio, podremos sustraer el mensaje que hemos entendido de la señal completa y aislar, así, el mensaje susurrado (*véase el recuadro* "Volumen variable contra las interferencias").

El segundo procedimiento se muestra superior al primero en el caso de redes con sólo dos transmisores y un receptor, pero se torna mucho más problemático cuando aumenta el número de emisores. El problema estriba en que la presencia de muchos emisores exige coordinación, ya que es necesario determinar quién transmite con mucha intensidad y quién con poca. Cualquier clase de coordinación implica, por sí misma, algún tipo de comunicación; por tanto, cuanto más esfuerzo hayamos de invertir en coordinar la transmisión, menos ancho de banda quedará disponible para transmitir el mensaje. La consecución de la estrategia óptima sigue siendo, hoy en día, objeto de estudio.

Nuevas herramientas

Aunque las redes ad hoc puedan resultar útiles en muy variadas circunstancias, un parámetro muy difícil de cuantificar es, precisamente, su grado de utilidad. Ni siquiera los parámetros más sencillos relativos a los límites de sus prestaciones son fáciles de determinar. ¿A qué ritmo nos permiten enviar la información? ¿En qué medida depende ese ritmo del número de aparatos en la red y del consiguiente nivel de interferencia? ¿Qué ocurre cuando se están moviendo todos los aparatos de la red? ¿Cómo conciliar de manera óptima un alto ritmo de transmisión, el retardo asociado a su distribución y la robustez del sistema?

Cuantificar las limitaciones de las redes ad hoc constituye una cuestión fundamental. Tal información permitiría a los diseñadores de redes crear nuevas técnicas y determinar mejoras en las redes ya existentes. Además, el conocimiento de dichos límites ayudaría a jerarquizar entre factores que compiten entre sí: tasa de transmisión, retardo y probabilidad de pérdidas, etcétera. Por ejemplo, las llamadas telefónicas y las teleconferencias son sumamente sensibles al retardo. Retardos notables o una información fragmentada y descoordinada generan interrupciones en la transmisión de audio y vídeo que dificultan sobremanera la conversación.

Una vez que los diseñadores conozcan la estructura de la red concreta sobre la que están trabajando, podrán programar cada aplicación para que priorice sus necesidades; un retardo bajo para las conversaciones telefónicas, pero pérdidas mínimas en los envíos de información indispensable.

El problema en evaluar los límites de las redes ad hoc estriba en su metamorfosis continua. Para conocer sus límites no basta con medir cómo se comporta la red en un momento dado, sino que hay que determinar cómo responderá bajo cada configuración posible.

Un planteamiento adoptado por los autores consiste en establecer una correspondencia matemática entre una red ad hoc dada y otra que conocemos mucho mejor: una red alámbrica ordinaria. Los expertos en teoría de la información disponen de métodos y de una experiencia de más de sesenta años para estudiar los flujos de información en las redes de cableado usuales. Estas carecen de interferencias y sus nodos permanecen fijos en un mismo sitio. Así pues, si queremos estudiar una determinada red ad hoc, primero hallamos un modelo de red alámbrica que reproduzca los rasgos esenciales del comportamiento de la red ad hoc. De esta manera logramos caracterizar sus límites empleando su "doble alámbrico" como guía. Esta manera de proceder nos ayuda a diseñar redes mejores, ya que nos permite conocer las implicaciones de cada diseño.

Hemos de reconocer que ni siquiera con estas herramientas esperamos que las redes ad hoc sustituyan a la infraestructura actual de telefonía móvil. Pero quizá sí sirvan para entender su funcionamiento justamente en las situaciones en las que la operatividad de una red ad hoc pueda resultar crucial.

Cuantificar los límites operativos de una red ad hoc requiere medir cómo se comportará ésta bajo cada configuración posible.



Bibliografía complementaria

REDES DE SENSORES INTELIGENTES PARA PERCIBIR EL MUNDO REAL. David E. Culler y Hans Mulder en *Investigación y Ciencia*, n.º 335; agosto de 2004.

SUPRESION DE ATASCOS EN LAS REDES. Michelle Effros, Ralf Koetter y Muriel Médard en *Investigación y Ciencia*, n.º 371; agosto de 2007.

ON A THEORY OF NETWORK EQUIVALENCE. Ralf Koetter, Michelle Effros y Muriel Médard. IEEE Information Theory Workshop on Networking and Information Theory, Volos (Grecia), págs. 326-330; 2009.

CAMBIO DE LAS GLOBAL

Los métodos econométricos ofrecen nuevas pruebas del cambio en las temperaturas y alertan sobre los riesgos de la intervención humana en el sistema climático

Carlos Gay García y Francisco Estrada

CONCEPTOS BASICOS

- Si la huella de las perturbaciones aleatorias que afectan al sistema climático no decrece con el tiempo, no podría decirse qué rumbo seguirán las temperaturas del planeta aunque aparentaran tener una tendencia de fondo a crecer.
- Hay técnicas econométricas que, incluso en esos casos no estacionarios, permitirían atribuir a la acción humana un calentamiento progresivo del planeta. Pero para aplicar esas técnicas es necesario que las temperaturas puedan representarse como procesos integrados.
- Los autores proponen otro enfoque econométrico que permite considerar las temperaturas como procesos en los que las perturbaciones se disipan con el tiempo y existe reversión a la media. Puede predecirse un aumento progresivo de las temperaturas planetarias por la acción humana, con unos pocos cambios en el ritmo de crecimiento espaciados en el tiempo.

A una sucesión de datos ordenados conforme al momento en que hayan sido tomados se le llama en estadística y econometría "serie de tiempo" o "serie temporal". Dichas series pueden ser determinísticas, estocásticas o una combinación de ambas. Si el proceso que genera esos datos es determinista, habrá una ecuación que prediga con exactitud los valores futuros de la serie a partir de los valores ya conocidos. Una ecuación así resulta particularmente sencilla si el proceso consiste en una tendencia lineal: para obtener el dato del tiempo t a partir del dato del tiempo $t-1$ basta con sumarle a éste una cantidad fija. Los datos de una serie de ese tipo se representarán gráficamente en función del tiempo como una recta; su pendiente será igual a esa cantidad fija que se añade.

En la realidad suele ocurrir que un proceso, aunque se atenga en líneas generales a una tendencia determinística, sufre perturbaciones que lo separan de la tendencia en cuestión. Esas perturbaciones forman, a su vez, su propia serie de tiempo. Que sean, o parezcan, aleatorias no quiere decir que no podamos expresar nada sobre ellas: tendrán una media, que a menudo será cero (lo mismo podrán darle que quitarle a la tendencia), sus valores se agruparán alrededor de esa media con cierto grado de dispersión, es decir, tendrán una cierta varianza, y la observación en el tiempo t mantendrá una relación de dependencia o independencia con los valores pasados de la serie. Esta relación se conoce como persistencia o memoria; suele representarse por medio de la función de autocorrelación, que mide el grado de asociación del valor en el tiempo t con las observaciones de los períodos $t-k$, donde k es mayor que cero.

Si el proceso no tiene memoria, el valor de la serie para el período t se obtendrá del valor $t-1$ restando de éste la perturbación del período $t-1$ y sumando una cantidad fija (la tendencia) y la perturbación del período t. Es decir, el valor en t de la serie será igual a t veces la cantidad fija más la perturbación añadida en t (más el valor que la serie tuviese en el instante cero).

Aunque cada período aportará una perturbación que contribuirá a separar de la tendencia el dato correspondiente al período de que se trate, la desviación con respecto a la tendencia en el período de marras



no tendrá necesariamente por qué ser igual a la perturbación generada en el período. El proceso puede tener memoria: la desviación estará influida entonces por la persistencia de algunas o *todas* las perturbaciones anteriores.

Si el proceso tiene memoria pero ésta no es infinita, las perturbaciones anteriores afectarán el valor actual de la serie, pero su efecto se disipará con el transcurso del tiempo. Es decir, la diferencia entre el valor observado y el valor de la tendencia en el tiempo t estará determinado únicamente por la perturbación en el tiempo t y una suma ponderada de las perturbaciones de un número limitado de períodos anteriores.

Si, por ejemplo, el proceso es autorregresivo de primer orden, el valor de la serie para el período t se obtendrá sumando la perturbación del período t, más φ veces la perturbación del período $t - 1$ y el valor de la tendencia en el tiempo t. Cuando φ es menor que la unidad en valor absoluto, se dice que el proceso es tendencia-estacionario (TE) y tiene ciertas propiedades como reversión a la media y una memoria finita.

En el caso particular en que φ es igual a uno, el valor en t de la serie será igual a la suma de *todas* las perturbaciones añadidas a lo largo de los t períodos (más el valor que la serie tuviese en el instante cero). Esta suma de perturbaciones aleatorias genera una tendencia estocástica, que también mostrará un movimiento de largo plazo pero que, a diferencia de un proceso de TE, no es predecible. A un proceso así se le denomina camino aleatorio.

Si las perturbaciones tienen una media nula, podría parecer que carecerá de importancia que el valor en t de la serie incluya en sí el valor de todas las perturbaciones anteriores o sólo el de la perturbación del propio período t, ya que la media incondicional de la serie no cambiará por ello. Pero el efecto de esta

1. ¿ES EL CALENTAMIENTO del sistema climático atribuible a la actividad humana? Mediante métodos econométricos, se muestran indicios de que el calentamiento observado durante el siglo XX no es fruto de la variabilidad natural del sistema.

PROCESOS DE RAIZ UNO: UN EJEMPLO SENCILLO

Supongamos una apuesta en la que se lanza una moneda justa, es decir, que tiene 50 por ciento de probabilidades de salir cara y 50 por ciento de que salga cruz. Cada uno de los lanzamientos puede verse como una realización de una variable aleatoria que sigue una distribución de Bernoulli. Cada realización es independiente, de tal suerte que el resultado de lanzar la moneda la vez n no está influida por el resultado de ninguna de las $n - 1$ veces anteriores. Imaginemos que por cada cara que se obtenga se recibe un euro, mientras que por cada cruz debe pagarse un euro. El valor esperado de dicha apuesta es cero; su varianza, un cuarto.

Consideremos ahora la variable aleatoria S_n, que consiste en la suma de todas las ganancias y pérdidas que se acumulan desde el primer hasta el n-ésimo lanzamiento de moneda. Nótese que ahora el valor que tome esta variable no es independiente del pasado: su valor después del n-ésimo lanzamiento depende sólo del acumulado de ganancias y pérdidas hasta $n - 1$ y del resultado del n-ésimo lanzamiento.

Si bien en este caso la esperanza de la variable S_n sigue siendo cero, su varianza crece con el número de apuestas. De hecho, si la apuesta se realizara un número infinito de veces, la varianza de S_n se haría infinita. El sumatorio de las realizaciones de la distribución de Bernoulli produce un tendencia estocástica que tiende a alejar cada vez más el valor de la variable de su valor esperado, mostrando crecimientos y disminuciones de forma impredecible. De esta manera, durante una racha afortunada, las ganancias crecerían de forma sistemática, mientras que las ganancias disminuirían de igual forma durante las rachas desafortunadas. Sin embargo, sería imposible pronosticar el momento en que terminaría o iniciaría cualquiera de ellas.

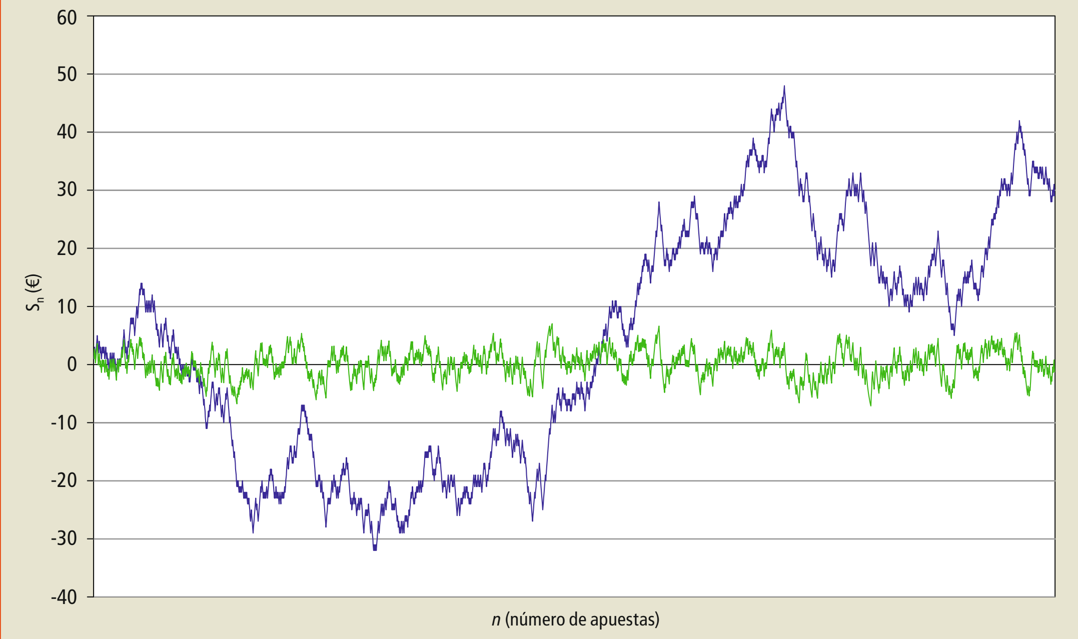
Consideremos ahora una nueva situación en la que sólo el 95 por ciento de las ganancias y pérdidas acumuladas hasta la apuesta del período anterior se conservan en el período actual. Supongamos que en el primer lanzamiento de moneda se obtiene una cara, por lo que se recibe un euro. Después del segundo lanzamiento, habremos acumulado 0,95 centavos de euro del período anterior, más el resultado del segundo lanzamiento. De esta forma, las ganancias/pérdidas en el lanzamiento n están dadas por 0,95 veces las ganancias/pérdidas obtenidas en el lanzamiento $n - 1$ y por el resultado de la n-ésima apuesta.

Esta pequeña reducción en el coeficiente φ que determina la memoria del proceso (proporción de ganancias/pérdidas que persiste de un período a otro) hace que las propiedades de series de tiempo de S_n cambien de forma notable. Lo mismo que en el caso anterior, el valor esperado del proceso es cero, pero ahora la varianza del proceso es finita sin importar el número de apuestas que se lleven a cabo, con lo que las ganancias/pérdidas acumuladas tendrán un límite.

Aunque el proceso tiene una memoria larga, ya no es lo suficiente como para que el resultado de cada apuesta tenga un efecto permanente sobre S_n y que, de esta forma, se genere una tendencia estocástica. Así, el proceso más bien fluctúa alrededor de su valor medio con excursiones cortas.

Procesos como los anteriores pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales estocásticas. El comportamiento de la variable será estacionario si el coeficiente φ es menor que la unidad en valor absoluto, condición similar a la de estabilidad cuando se trata de ecuaciones diferenciales deterministas. Cuando el coeficiente es igual a uno, la serie tendrá una tendencia estocástica y mostrará un comportamiento similar al descrito en la primera apuesta. Cuando el valor del coeficiente es mayor a la unidad en valor absoluto, la serie mostrará un comportamiento explosivo.

En general, el valor en el período n de la variable de que se trate podría depender no sólo de su valor en el período inmediatamente anterior, sino de varios períodos anteriores. En ese caso, la condición equivalente a que φ valga 1 entraña mayor complejidad: los factores que multiplican al valor de la variable en los p períodos que influyen en el valor presente deben ser tales que una ecuación de orden p construida con ellos como coeficientes ("ecuación característica") tenga al menos una raíz que valga 1. De ahí el nombre de "proceso de raíz uno".



La figura muestra la variable S_n bajo los dos tipos de juego de apuesta antes descritos. A pesar de que la secuencia de resultados de lanzamientos de moneda es la misma en ambos casos, el comportamiento de S_n es distinto, pues depende del valor de φ, que determina la memoria del proceso. Ello explica las diferencias entre un proceso de raíz unitaria (*azul*) y un proceso estacionario con $\varphi = 0{,}95$ (*verde*).

CARLOS GAY GARCIA Y FRANCISCO ESTRADA

suma de perturbaciones sobre la varianza del proceso es muy distinto. Si se suman todas las perturbaciones precedentes se sumarán también todas sus varianzas. La varianza, pues, se irá acumulando indefinidamente con el paso del tiempo: se tenderá a ir observando desviaciones cada vez mayores, en un sentido u otro, con respecto a un valor medio. Es decir, el proceso no muestra reversión a la media, las perturbaciones no se disipan y la incertidumbre del pronóstico aumentará sin límite según aumente el horizonte de pronóstico.

Sin embargo, si se toman las diferencias entre elementos consecutivos a un proceso de camino aleatorio, como el que se acaba de describir aquí, se obtendrá una nueva serie estacionaria (que no contiene una tendencia). Tendremos entonces un proceso diferencia-estacionario (DE).

De un proceso que no es estacionario, pero sí lo es en las primeras diferencias, se dice también que es un proceso integrado de primer orden. Los procesos integrados de primer orden cumplen una propiedad matemática: su ecuación característica tiene raíz uno. Este es un valor frontera que marca el final de la estacionariedad; en el caso de un proceso autorregresivo de primer orden, esta condición es equivalente a que el coeficiente φ sea igual a uno: si el valor para $t-1$ se multiplicase por un coeficiente menor que uno en valor absoluto, en el valor en t no entraría ya la suma de todas las perturbaciones anteriores, sino la suma de esas perturbaciones pero con cada una de ellas multiplicada por una potencia del coeficiente tanto mayor cuanto más antigua fuese la perturbación; al ser potencias de un número menor que uno en valor absoluto, el efecto de las perturbaciones se iría borrando con el tiempo. De ahí que cuando se habla de un proceso de raíz, suele pensarse en un proceso de memoria infinita (*véase el recuadro* "Procesos de raíz uno: un ejemplo sencillo").

En la práctica resulta muy difícil poder distinguir entre procesos DE y TE. En economía, por ejemplo, se ha discutido durante decenios si series como el producto interno bruto están mejor representadas por procesos de un tipo o del otro. Esta distinción se hace todavía más difícil cuando los parámetros de la función de tendencia no permanecen constantes, como puede suceder en escalas de tiempo mayores: el intercepto y la inclinación de la recta pueden cambiar con el tiempo.

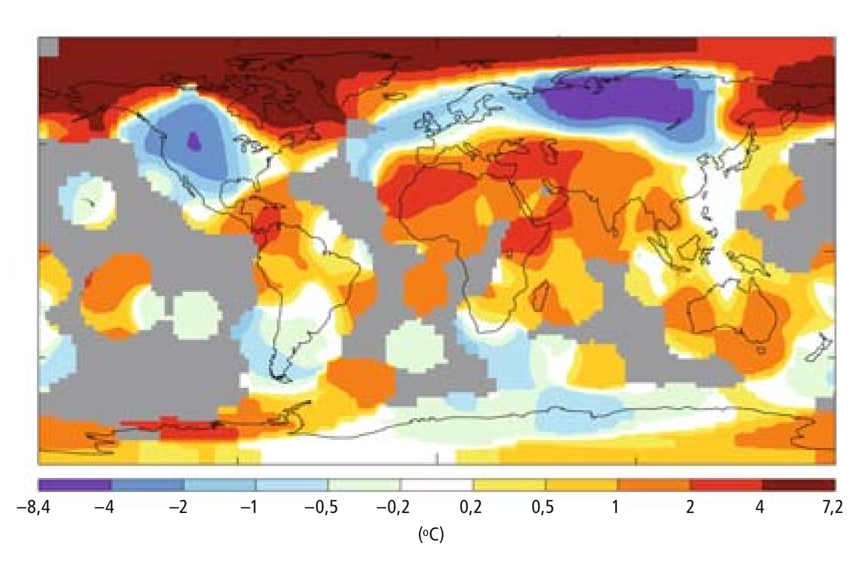
Temperaturas global y hemisféricas, ¿procesos de raíz unitaria?

Las temperaturas global y hemisféricas (TGyH) muestran desde principios del siglo XX una evolución a medio y largo plazo ascendente, con numerosos picos y simas. Ahora bien, ¿las series de las TGyH corresponden a procesos de TE o de DE?

Que las series de las TGyH se consideren procesos de TE o DE encierra su interés, ya que estos procesos ofrecen visiones contrastadas de cómo funciona el sistema climático y sobre la detección y caracterización del cambio climático observado.

Bajo la hipótesis de un proceso de TE, el comportamiento de largo plazo está definido por una tendencia determinística: el proceso muestra reversión a la media, por lo que las perturbaciones tendrían una persistencia limitada y no afectarían su evolución en el largo plazo. Así, el movimiento secular y las variaciones de largo plazo (en nuestro caso, los cambios climáticos) estarían determinados por cambios en agentes externos (geometría orbital, irradiancia solar, concentraciones de gases de efecto invernadero y cambios en otras variables de forzamiento radiativo). El incremento en la temperatura global de los últimos decenios podría considerarse una tendencia de largo plazo generada por el aumento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero. Por otra parte, el componente estocástico estacionario de ese proceso representaría la variabilidad natural de más corto plazo y mostraría una persistencia limitada.

De esa manera, las proyecciones de largo plazo están dominadas por los agentes externos —tal y como ocurre en los modelos físicos



NASA/INSTITUTO DE ESTUDIOS ESPACIALES GODDARD *GISS*

2. ANOMALIAS DE LA TEMPERATURA en diciembre de 2009 respecto del período 1951-1980. Estas anomalías, que representan variaciones de hasta más de cuatro grados centígrados para algunas regiones del planeta, corresponden a una temperatura media global de tan sólo 0,66 ºC superior al promedio de dicho período. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, para finales del presente siglo se esperan incrementos en la temperatura media global en un rango de 1,8 ºC a 4 ºC, aunque no se descartan aumentos de hasta 6,4 ºC.

Los autores

Carlos Gay García y **Francisco Estrada** son académicos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ambos participaron en la elaboración del capítulo sobre Latinoamérica del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Gay dirige el grupo de Cambio Climático del Centro de Ciencias de la Atmósfera y coordina el Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM. Estrada es economista. Centra su investigación en la modelación y simulación de los impactos del cambio climático, la modelación estadística de series de tiempo climáticas y la incertidumbre.

del clima—, mientras que la estructura de autocorrelación del proceso (las relaciones que entre sí guarden las perturbaciones aleatorias) proveería información importante para el pronóstico de corto plazo.

Por el contrario, los procesos DE no muestran reversión a la media y tienen una memoria infinita, por lo que las perturbaciones no se disipan. Semejante acumulación de perturbaciones da lugar a una tendencia estocástica, en la que existe un movimiento sistemático, aunque impredecible. La varianza del proceso crece con el tiempo y diverge a infinito; el error de pronóstico no está acotado.

Asumir la presencia de un proceso de raíz uno, en el sentido de que posea una memoria infinita, implicaría que las series de TGyH son procesos altamente inestables: eventos aislados como La Niña de 1974 o la erupción del Krakatoa en 1883 habrían cambiado la evolución a largo plazo de las temperaturas; su efecto persistiría en nuestros días. En este caso, la temperatura global sería difícilmente predecible aun cuando los agentes externos se mantuvieran constantes.

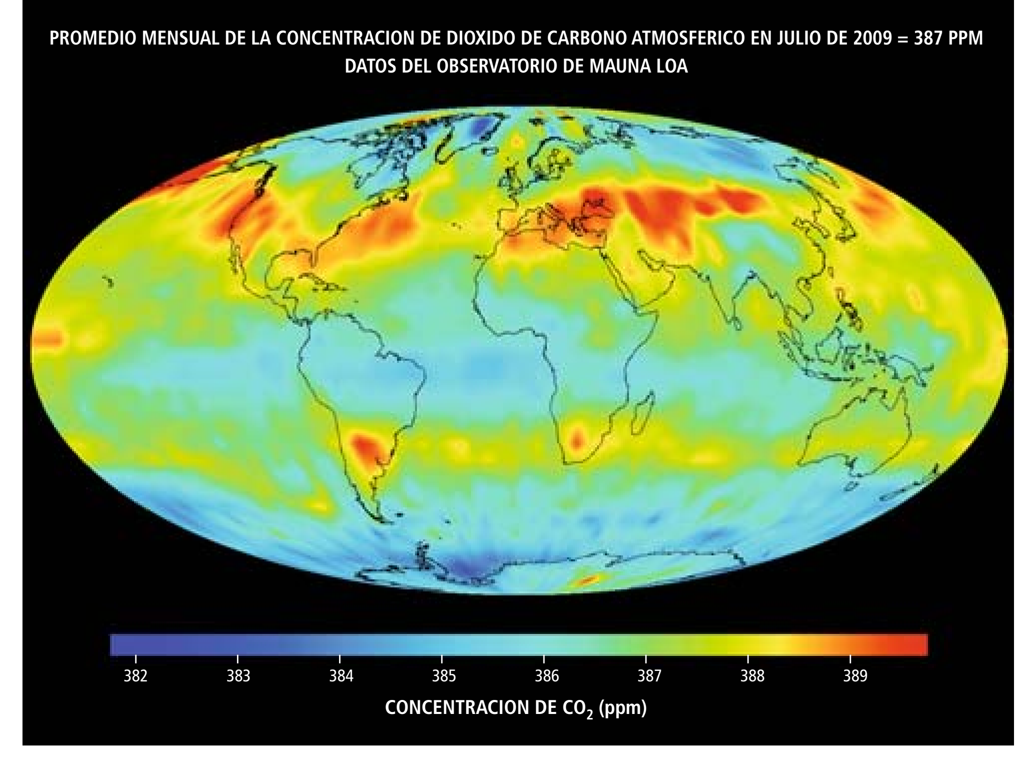
Interpretaciones

Existen dos interpretaciones, en cuanto al cambio climático se refiere, bajo el supuesto de que las TGyH son DE. Según una de ellas, dado que el comportamiento de la tendencia sería entonces aleatorio, no podría afirmarse que el planeta está en un proceso de calentamiento sistemático; por lo tanto, no habría datos que avalasen que se está produciendo un cambio climático antropogénico.

La otra surgió a finales de la década de los noventa, mediante técnicas econométricas llamadas de cointegración. Dichas técnicas permiten demostrar la existencia de relaciones de largo plazo entre series que contienen procesos de raíz unitaria. Según diversos análisis, la serie de temperatura global, así como la del forzamiento radiativo, compartirían una misma tendencia estocástica; por tanto, el aumento en la temperatura global podría atribuirse al incremento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero.

La cointegración se presentaba, pues, como una manera directa y estadísticamente rigurosa de atribuir el aumento en la temperatura global a las actividades antropogénicas. Sin embargo, para que las inferencias realizadas con técnicas de cointegración sean válidas, es requisito indispensable que las TGyH correspondan a procesos de raíz uno.

Nuestro análisis conduce a otra conclusión, que ofrece una interpretación más consistente con la física que los resultados obtenidos a través de los análisis de cointegración. Mediante técnicas econométricas modernas, hemos demostrado que pueden representarse las TGyH de manera estadísticamente adecuada como procesos de tendencia-estacionario, pero donde los parámetros de la tendencia son a su vez procesos estocásticos integrados, cuyas realizaciones son poco frecuentes: ocurren sólo a lo largo de los decenios o de los siglos.

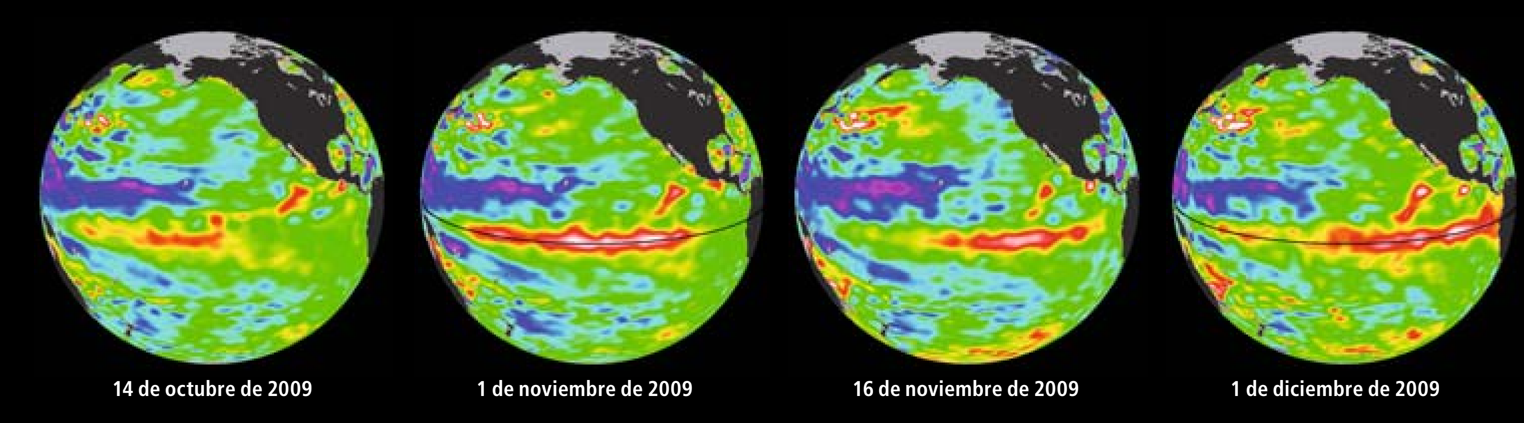


NASA/JPL

3. PATRONES DE TRANSPORTE de gran escala de las concentraciones de dióxido de carbono troposférico. Cuanto mayores son las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, mayor es la temperatura global de equilibrio. Sin embargo, las propiedades de las series temporales de temperatura global y de forzamiento radiativo hacen que resulte difícil establecer una relación de largo plazo entre ellas con métodos estadísticos. Mediante el uso de técnicas econométricas, los autores muestran que las temperaturas global y hemisféricas pueden describirse como procesos tendencia-estacionarios con cambios estructurales en su pendiente, debidos, presumiblemente, al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

EL NIÑO Y LAS ONDAS KELVIN

Esta serie de imágenes muestra anomalías positivas de la altura media del mar en el Pacífico ecuatorial propagándose hacia el este en forma de ondas de Kelvin. Los datos, procedentes del satélite oceanográfico Jason-2, indican la altura del nivel del mar: se distinguen zonas entre 10 y 18 centímetros por encima del nivel normal (*rojo* y *blanco*), y zonas entre 8 y 15 centímetros por debajo del nivel normal (*azul* y *púrpura*). Series de ondas como ésta desencadenan y mantienen el fenómeno de El Niño (oscilación del sur).



14 de octubre de 2009 — 1 de noviembre de 2009 — 16 de noviembre de 2009 — 1 de diciembre de 2009

El Niño constituye el fenómeno acoplado océano-atmósfera más importante para la variabilidad interanual del clima. El episodio de El Niño de 1998 contribuyó de forma notable a que en ese año se alcanzaran las temperaturas globales más altas registradas en el siglo XX. Si la temperatura global fuera un proceso de raíz unitaria, los efectos de episodios como El Niño de 1998 no se disiparían y tendrían una influencia permanente sobre ésta.

NASA/JPL *Equipo de Topografía de la Superficie Oceánica*

Las realizaciones de esos procesos integrados corresponderían a cambios importantes en agentes externos clave: cambios en la órbita terrestre, en la irradiancia solar y en las concentraciones de gases de efecto invernadero. De ese modo, las series anuales observadas de TGyH durante el período 1870 a 2004 muestran un cambio estructural en la pendiente de la función de tendencia en los años 1977, 1985 y 1911 en las series global, del hemisferio norte y del hemisferio sur, respectivamente.

En el caso de las temperaturas global y del hemisferio norte, los resultados muestran una tendencia de calentamiento en dos etapas. Durante casi todo el siglo XX se presenta una tendencia moderada, seguida por un aumento rápido y de una magnitud mucho mayor durante los últimos dos o tres decenios del siglo: la pendiente de la temperatura global después del cambio estructural es 5 veces mayor, mientras que la del hemisferio norte es 8 veces mayor. Por otra parte, el hemisferio sur muestra una ligera tendencia al enfriamiento hasta finales de la primera década del siglo XX y un calentamiento moderado después de esta fecha.

Dado que la mayor parte del hemisferio sur está compuesto por océano, el retraso en el inicio de la tendencia de aumento en la temperatura, en comparación con las temperaturas globales y del hemisferio norte, podría deberse a la reacción lenta de los océanos ante cambios en los agentes debido a su poderosa capacidad calorífica. En ese caso, el calentamiento moderado mostrado por la temperatura del hemisferio sur podría corresponder a la primera etapa de calentamiento manifestada por las otras dos series y, por lo tanto, podría esperarse un futuro cambio de una magnitud mayor en la pendiente de la temperatura del hemisferio sur.

Las propiedades de las series de tiempo de las TGyH revelan que el cambio climático se ha manifestado como un fenómeno de cambio en la media, sin afectar a otros momentos de su distribución. En particular, importa para las evaluaciones de riesgo que la variabilidad de las series no haya aumentado (o disminuido) con el cambio climático que se ha observado.

Los análisis econométricos realizados demuestran la naturaleza exógena del cambio estructural mostrado por las series y refuerzan los estudios paleoclimáticos recientes, en el sentido de que el calentamiento observado durante el siglo XX no puede ser interpretado como una realización de la variabilidad natural de la temperatura. De acuerdo con esos estudios, la fuente más probable del calentamiento reside en el forzamiento antropogénico.

Dada la velocidad del cambio y su magnitud, muy cercana al límite considerado "cambio climático peligroso" de 0,2 ºC por decenio, puede argumentarse que, en términos del Artículo 2 de la Convención Marco sobre Cambio Climático de la ONU, ya ha ocurrido una intervención antropogénica peligrosa en el sistema climático.

Bibliografía complementaria

EVIDENCE FOR HUMAN INFLUENCE ON CLIMATE FROM HEMISPHERIC TEMPERATURE RELATIONS. Robert Kaufmann y David Stern en *Nature*, vol. 388 págs. 39-44; 1997.

UNIT ROOTS, COINTEGRATION AND STRUCTURAL CHANGE. Gangadharrao Soundaryarao Maddala e In-Moo Kim en *Themes in Modern Econometrics*; Cambridge University Press, 1998.

DEALING W ITH STRUCTURAL BREAKS. Pierre Perron en *Palgrave Handbook of Econometrics, vol. 1: Econometric Theory*, dirigido por K. Patterson y T. C. Mills, Palgrave Macmillan, págs. 278-352; 2006.

GLOBAL AND HEMISPHERIC TEMPERATURES REVISITED. Carlos Gay García, Francisco Estrada y Armando Sánchez en *Climatic Change*, vol. 94, n.º 3, págs. 333-349; 2009.

Caprichos de la reflexión

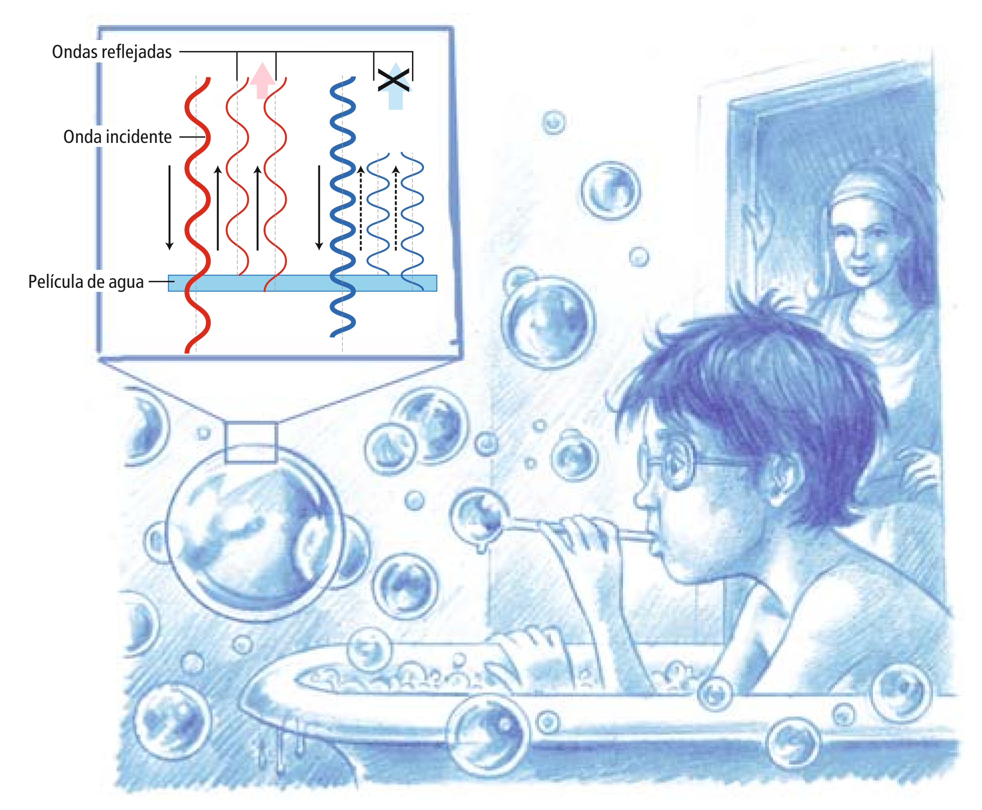
Apilando capas transparentes e incoloras, se crean colores tornasolados... o se eliminan reflejos molestos

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Los espejos plateados de nuestro cuarto de baño reflejan toda la luz visible. En cambio, la naturaleza, más selectiva, ha concebido superficies que reflejan sólo determinados colores, como los caparazones de tintes tornasolados de ciertos insectos o crustáceos. El examen de uno de esos caparazones no revela, empero, sino una sucesión de finas capas transparentes... ¡e incoloras! ¿De dónde proviene el color, entonces? Para averiguarlo, comencemos jugando con burbujas de jabón.

La coloración de las pompas de jabón es variable, si bien el agua, aun jabonosa, es incolora. Esos tintes se deben a la naturaleza ondulatoria de la luz. La luz blanca es una superposición de diferentes ondas electromagnéticas sinusoidales, cuyas longitudes de onda van desde los 0,40 micrómetros en el caso del violeta hasta los 0,75 micrómetros del rojo.

Una película de jabón es una lámina con cierto grosor. Cada una de las ondas incidentes se refleja en las dos caras que constituyen las paredes de la película. Después, esas dos ondas reflejadas se recombinan e interfieren. Dado que una y otra no han recorrido el mismo camino, tampoco han efectuado el mismo número de oscilaciones antes de recombinarse. Para ciertas longitudes de onda (es decir, para ciertos colores), las dos ondas reflejadas estarán en fase; la interferencia será constructiva y la reflexión de esos colores se reforzará. En cambio, para otras longitudes de onda, ambas ondas estarán en oposición de fase; la interferencia será destructiva y la reflexión desaparecerá (*véase la figura 1*).



1. Una onda luminosa que incide sobre una lámina de jabón se refleja en su cara externa y en su cara interna. Para mayor claridad, las ondas reflejadas se muestran aquí desplazadas paralelamente a la onda incidente. Para un espesor dado de la película de agua, puede haber, en función de la longitud de onda, una interferencia constructiva (*rojo*) o destructiva (*azul*) de las dos ondas reflejadas.

BRUNO VACARO

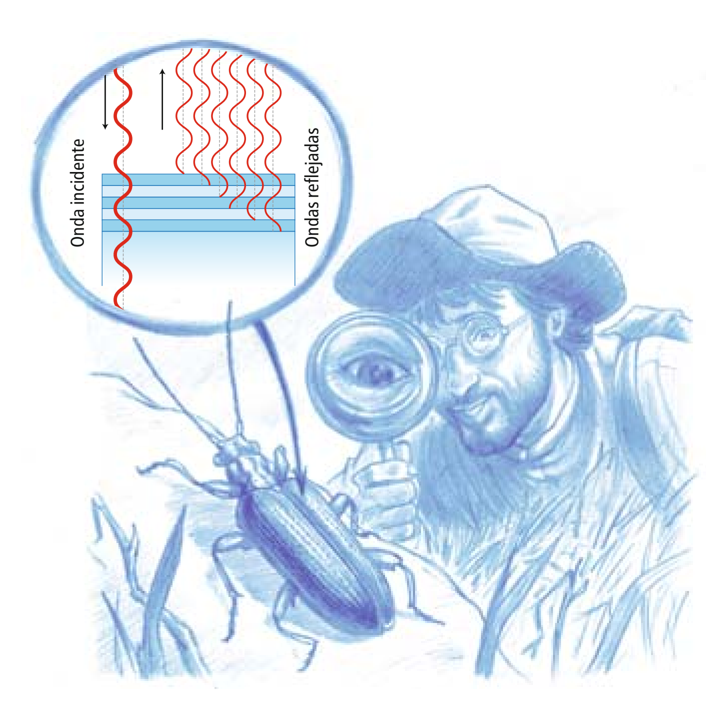
Pompas de jabón: doble reflexión

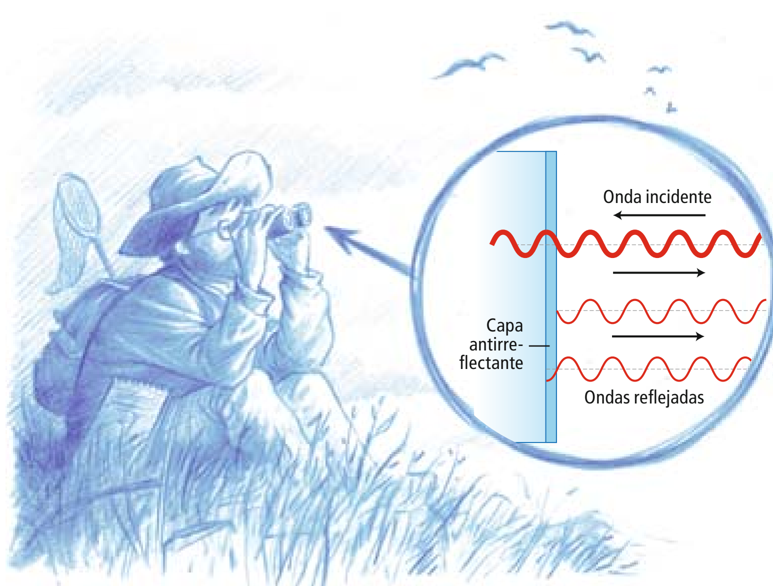
Para averiguar si un color se refleja o no, hay que estudiar el trayecto de las dos ondas reflejadas. La primera procede de la reflexión en la cara externa de la película de jabón. Dado que el índice de refracción del agua es mayor que el del aire, en dicha pared la onda se refleja de modo análogo a como lo hace una sacudida que se propaga por una cuerda con un extremo fijo: al llegar al extremo, no sólo se invierte su sentido de propagación, sino que, además, la fase de la onda reflejada cambia de signo con respecto a la fase de la onda incidente.

La segunda onda procede de la reflexión en la cara interna de la película. Dado que en esta segunda superficie agua-aire la relación entre los índices de refracción es la opuesta a la anterior, la fase de la onda reflejada no cambia de signo, sino que permanece igual a la de la onda incidente.

Cuanto más gruesa es la película, más oscilaciones ejecuta la onda que va y vuelve por el interior de la lámina. Si la película es muy fina, esa onda se superpone, prácticamente sin haber oscilado, con la onda reflejada en la primera pared, cuya fase, recordemos, se había invertido en la primera reflexión. Por tanto, en el caso límite (una lámina de "grosor cero"), ambas ondas se hallarán en oposición pura. Las dos ondas reflejadas se cancelarán mutuamente y, con independencia de su color, no se reflejará luz alguna. He aquí por qué, justo antes de que una pompa de jabón estalle, pueden observarse en su superficie pequeños discos totalmente negros cuyo diámetro aumenta progresivamente. Es en esas zonas donde la pared adelgaza al máximo y por donde reventará la burbuja.

En el caso de una película más gruesa, la onda reflejada en la cara interna





2. Alternando capas del mismo espesor pero de distintos índices de refracción, la interferencia es constructiva sólo para ciertas longitudes de onda. Estas determinan la coloración de la superficie, que varía en función del ángulo de visión.

3. Para eliminar los reflejos en la lente de un instrumento óptico, se reviste el vidrio con una capa de algún material que posea un índice de refracción intermedio entre el del aire y el de la lente. Si el espesor de la capa es igual a un cuarto de la longitud de la onda que se desea eliminar, se consigue una interferencia destructiva.

ya no se encontrará necesariamente en oposición de fase con la primera. Si el espesor de la película es igual a un cuarto de la longitud de la onda en el agua (igual a la longitud de onda en el vacío dividida por el índice de refracción del agua, n = 1,33), ambas ondas oscilarán constructivamente y la reflexión se acentuará. El espesor requerido es de unos 0,075 micrómetros para el violeta y de unos 0,140 micrómetros para el rojo. Así pues, en función del espesor de la película, cada longitud de onda se refleja de un modo diferente, lo que se traduce en los diferentes colores que vemos.

¿Cómo emplear la reflexión para seleccionar colores? Los colores vivos y metálicos de diversos insectos nos dan la pista. El caparazón de ciertos coleópteros consta de cinco capas superpuestas, cuyos espesores aseguran la reflexión de cierto color dominante (*véase la figura 2*). Esa multiplicidad de capas hace que el menor desvío en la longitud de onda dé lugar a interferencias destructivas, de modo que se refleja sólo un color determinado.

Unas capas reflejan, otras no

Esos "espejos" selectivos con los colores también lo son con respecto a las orientaciones, ya que el recorrido efectuado por la luz en cada capa depende de la dirección de incidencia. Ciertas gambas se aprovechan de ambas selectividades. Poseen en el vientre un reflector eficiente en los azules, además de unas células luminiscentes que emiten luz azulada. Esa combinación les permite brillar con una luz parecida a la solar tal y como ésta se ve desde las profundidades; es decir, con el mismo color y la misma repartición direccional. Así, esos crustáceos se confunden con el cielo y son poco visibles para los depredadores de los fondos marinos.

En vez de aumentarla, podríamos desear reducir la reflexión de ciertos colores. Un simple vidrio de gafas refleja del orden del 8 por ciento de la luz incidente. Pero si está tallado en vidrio orgánico, la reflexión llega al 13 por ciento y resulta molesta. Para evitarlo, se deposita sobre el vidrio una capa fina de un medio óptico diferente, con un índice de refracción intermedio entre el del aire y el del vidrio (*véase la figura 3*). De ese modo, las reflexiones que se produzcan en ambas caras de la película (aire-capa y capa-vidrio) serán de la misma naturaleza (la fase cambia de signo). Sin embargo, la onda reflejada en la cara interna sufre el retardo debido al trayecto de la luz en el seno de la capa. En este caso, cuando el espesor de la capa es igual a un cuarto de la longitud de la onda en ese medio óptico, las dos ondas reflejadas están en oposición de fase y se anulan.

Ese tratamiento, ya útil para las gafas, se revela indispensable en el caso de los objetivos fotográficos o los prismáticos, que pueden estar formados por hasta 10 lentes, es decir, 20 superficies reflectoras. Su presencia se detecta mirando de lado el objetivo: la capa antirreflectante pierde su eficacia cuando la luz incide muy sesgada, por lo que en la superficie de la lente se aprecian reflejos de color pastel.

Los ópticos hacen prodigios controlando la reflexión y la transmisión mediante las multicapas, superficies que reflejan totalmente ciertas longitudes de onda al tiempo que transmiten completamente otras. Tal es el caso de los "espejos fríos" inventados hace medio siglo por Harold Shroeder y sus colaboradores de la compañía Bausch & Lomb. Empleados en los proyectores de cine, esos espejos reenvían un haz lumínico compuesto sólo por luz visible. En cambio, dejan pasar hacia atrás toda la luz infrarroja, cuyo único efecto consiste en calentar la zona iluminada sin hacerla más visible. A falta de un premio Nobel, sus inventores fueron recompensados en 1959 con un Oscar Técnico, ya que sus espejos redujeron fuertemente la fastidiosa tendencia de los proyectores de cine a inflamar las cintas.

BRUNO VACARO

Computación cuántica

Un sueño que podría hacerse realidad

Agustín Rayo

Los ordenadores cuánticos difieren de los ordenadores clásicos (es decir, los ordenadores comunes y corrientes) de manera fundamental.

Un programa de cómputo clásico trabaja con *bits* de información. Un bit es una variable que puede tomar uno de dos valores: 0 o 1. La implementación física de un bit es un objeto que puede hallarse en dos estados diferentes. Un transistor, por ejemplo, puede utilizarse para almacenar un bit de información porque funciona como un interruptor con dos estados posibles: "abierto" y "cerrado".

Los programas de cómputo cuántico, en cambio, trabajan con *qubits* de información. (del inglés *quantum bit*). A diferencia de un bit, cuyos valores posibles son el 0 y el 1, los estados posibles de un qubit corresponden a *superposiciones* de dos estados cuánticos, que denotaremos respectivamente $|0\rangle$ y $|1\rangle$.

Como primera aproximación, podríamos pensar en una superposición de estados como una especie de "mezcla" entre $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Pero el concepto de superposición es difícil de describir con precisión en pocas palabras. Afortunadamente, lo único que hace falta saber para nuestros propósitos es lo siguiente:

- Cuando un sistema cuántico se encuentra en el *estado* $|0\rangle$, eso quiere decir que el *resultado* de realizar una medida será siempre 0 (y análogamente para el estado $|1\rangle$ y el resultado 1).
- Cuando un sistema cuántico se encuentra en una *superposición* de $|0\rangle$ y $|1\rangle$, la "mezcla" particular que describe esa superposición determina la *probabilidad* de que, al realizar una medición, el resultado sea 0 o 1.

Dado que un transistor carece de estados superpuestos, no es un buen candidato para la realización física de un qubit. Pero las partículas cuánticas son diferentes. De acuerdo con la mecánica cuántica, hay partículas cuyos estados físicos son precisamente superposiciones del tipo que necesitamos. (Para los que sepan de estas cosas, las partículas que tengo en mente son sistemas cuánticos de dos niveles.)

El *espín* es una propiedad fundamental de las partículas cuánticas. Cuando se mide el espín de un protón (con respecto a un cierto eje), el resultado es siempre uno de dos valores: "arriba" o "abajo". Pero, *antes* de la medición, el protón no tiene necesariamente uno de esos dos valores: el valor de la función de onda del protón puede ser una superposición de los estados $|\text{arriba}\rangle$ y $|\text{abajo}\rangle$.

El resultado es que ciertas partículas cuánticas pueden utilizarse como realización física de un qubit. En el caso más simple (un ordenador cuántico de un solo qubit), la memoria de nuestro ordenador constaría simplemente de una partícula. Para ingresar información en el ordenador, escogemos una superposición que se corresponda con la información dada y modificamos la partícula de manera que su estado de espín se corresponda con esa superposición. Para computar una operación con la información almacenada, modificamos el estado de la partícula. Y, para extraer información de la memoria del ordenador, medimos el espín de la partícula, obteniendo siempre el resultado "arriba" o "abajo" (que interpretaremos como 0 o 1).

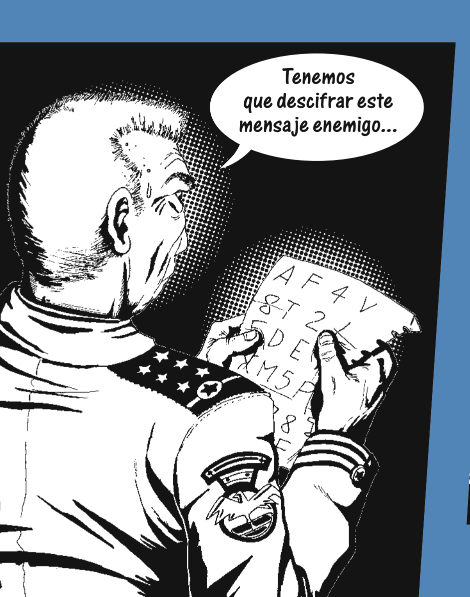
Entrelazamiento cuántico

Las propiedades más interesantes de los ordenadores cuánticos sólo surgen, sin embargo, cuando tenemos a nuestra disposición más de un qubit.

En un ordenador clásico, cada bit de información funciona de manera independiente. Cuando tenemos un circuito de dos transistores, por ejemplo, cada transistor puede estar "abierto" o "cerrado", y su estado es independiente del estado de su compañero. En un ordenador cuántico, en cambio, diferentes qubits pueden estar *entrelazados*.

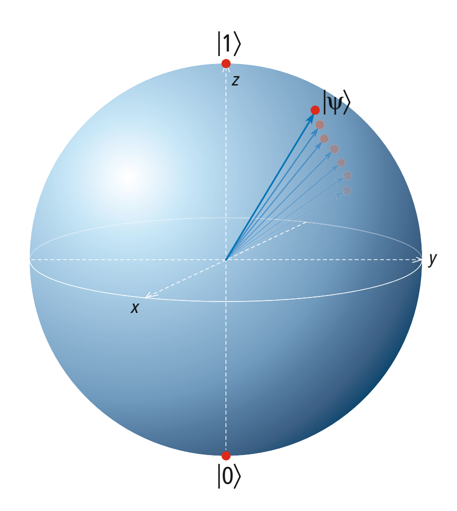
El entrelazamiento cuántico es uno de los fenómenos físicos más extraños que se conocen. Cuando dos partículas cuánticas están entrelazadas, están relacionadas de tal manera que es imposible dar una buena descripción de una de ellas sin hablar de la otra, aun cuando las partículas se encuentren físicamente separadas [*véase* "La realidad de los cuantos", por Anton Zeilinger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2009].

Consideremos un ejemplo: una partícula cuántica se halla en una cierta super-









Los estados cuánticos de un *qubit* guardan una relación uno a uno con los puntos en la superficie de una esfera. Los polos se corresponden con los estados |1⟩ y |0⟩. En un estado genérico |ψ⟩, la probabilidad de obtener 0 o 1 como resultado de una medida se calcula a partir de la proyección ortogonal sobre el eje *z* de la flecha que une el centro con el punto de la esfera asociado a |ψ⟩.

posición de estados tal que, si se mide su espín, la probabilidad de que obtengamos el resultado "arriba" es del 50 % y la probabilidad de que obtengamos el resultado "abajo" es del 50 %. Como consecuencia, el resultado de una medición particular es absolutamente impredecible.

Pero cuando dos partículas están entrelazadas, ocurre algo muy sorprendente. El resultado de medir el espín de una de ellas seguirá siendo absolutamente impredecible (y seguiremos obteniendo el resultado "arriba" el 50 % de las veces y el resultado "abajo" el 50 % de las veces). Una vez hayamos medido el espín de una de las partículas entrelazadas, podremos tener la certeza absoluta de que obtendríamos el mismo resultado si midiéramos el espín de la otra (en el caso de un tipo de entrelazamiento) o el resultado opuesto (en el caso de otro tipo de entrelazamiento).

El enlazamiento de partículas permite que los ordenadores cuánticos sean extraordinariamente potentes. En un ordenador clásico, los bits son independientes entre sí; por tanto, tienen que ser controlados de manera independiente. (En un ordenador de transistores, por ejemplo, es necesario llevar a cabo una operación básica diferente cada vez que queramos cambiar el estado de un transistor.) Esto hace que la implementación de ciertos programas de cómputo requiera un gran número de operaciones básicas. En cambio, en el caso de un ordenador cuántico con qubits entrelazados, existen operaciones básicas que modifican el estado cuántico del *sistema entero* y, por tanto, de varios qubits a la vez. Ello permite que ciertas funciones puedan computarse con mayor eficiencia (es decir, realizando menos operaciones) que en un ordenador clásico.

Criptografía

En entregas anteriores de "Juegos matemáticos" hemos visto que muchos de los métodos criptográficos que utilizamos para mantener seguros nuestros secretos dependen de que no existan métodos eficientes para descomponer un número en sus factores primos [*véase* "P = NP", por Agustín Rayo; Investigación y ciencia, abril de 2010].

Mientras limitemos nuestra atención a ordenadores clásicos, el supuesto es razonable. Ningún programa de cómputo clásico conocido hasta la fecha permite solucionar el problema de la factorización de manera realmente eficiente. Pero, en 1994, el matemático norteamericano Peter Shor (ahora en el Instituto de Tecnología de Massachusetts) demostró que el problema puede solucionarse de manera eficiente utilizando un ordenador cuántico.

Eso significa que la existencia de un ordenador cuántico de potencia suficiente tendría un impacto muy significativo. Muchos de nuestros mejores métodos criptográficos se tornarían instantáneamente vulnerables. Para preservar nuestros secretos necesitaríamos una nueva generación de métodos criptográficos: los llamados métodos "post-cuánticos".

Y claro, si un país tuviera ordenadores cuánticos lo suficientemente potentes sin que lo supieran sus enemigos, dispondría de una ventaja formidable.

Implementaciones físicas

Un ordenador cuántico con capacidad de ejecutar el algoritmo de Shor para números grandes requeriría un gran número de qubits entrelazados, y no es fácil entrelazar partículas. No sólo eso: una vez que las partículas están entrelazadas, no siempre es fácil que permanezcan entrelazadas. Y todo esto es más difícil todavía si se desea estar en posición de manipular las partículas entrelazadas, tal y como requiere la computación cuántica.

A la fecha nadie ha conseguido construir un ordenador cuántico que consista en más de unas cuantas partículas entrelazadas. No obstante, recientemente ha habido progresos sustanciales. En los últimos cinco años, diferentes laboratorios han logrado entrelazar hasta 8 qubits. De hecho, se ha logrado implementar el algoritmo de Shor para números muy pequeños (en particular, se pudo descomponer $15 = 3 \times 5$).

Muchos de los métodos que se emplean para entrelazar qubits, para preservar el entrelazamiento y para manipular las partículas entrelazadas son extraordinariamente complicados, y en algunos casos no es obvio que puedan utilizarse para construir ordenadores cuánticos que tengan un interés práctico. Pero el progreso ha sido increíblemente rápido.

En 2009, el laboratorio de Robert Schoelkopf en la Universidad de Yale anunció la construcción de un ordenador cuántico basado en un circuito eléctrico, con algunas de las mismas características de los circuitos eléctricos de los ordenadores clásicos.

El ordenador cuántico de Yale tiene tan sólo cuatro qubits (si bien en 2009 contaba con sólo dos). Pero el hecho de que esté basado en un circuito eléctrico es extraordinariamente importante, ya que, en principio, dicha técnica podría utilizarse para construir ordenadores cuánticos con suficientes qubits como para computar funciones realmente interesantes.

Queda mucho por hacer, pero no es imposible que los ordenadores cuánticos formen parte de nuestras vidas en un futuro próximo. Y, sobre la marcha, se ha aprendido muchísimo sobre el mundo cuántico.

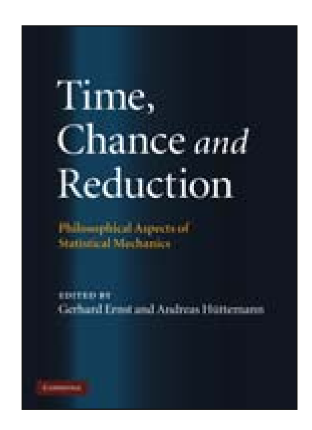
¿Quiere saber más?

El profesor Steven Girvin, de la Universidad de Yale, ofrece una magnífica introducción a la computación cuántica en la siguiente entrevista: **http://video.google.com/videoplay?docid=4710465925652391006**

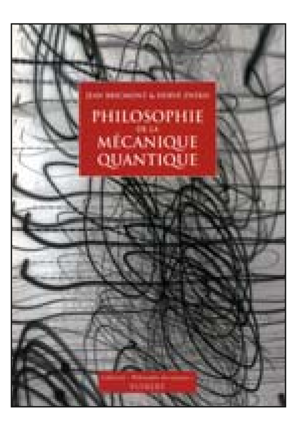
También hay una buena discusión sobre ordenadores cuánticos en Wikipedia: **http://es.wikipedia.org/wiki/Computación_cuántica**

Para una discusión más detallada del trabajo de Schoelkopf y su laboratorio, recomiendo: CIRCUITS THAT PROCESS WITH MAGIC. R. Simmonds y F. Strauch en *Nature*, vol. 460, 9 de julio de 2009.

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



TIME, CHANCE *AND* REDUCTION. PHILOSOPHICAL ASPECTS OF STATISTICAL MECHANICS.
Dirigido por Gerhard Ernst y Andreas Hüttemann. Cambridge University Press; Cambridge, 2010.



PHILOSOPHIE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE,
por Jean Bricmon y Hervé Zwirn. Vuibert; París, 2009.

Filosofía de la física

Epistemología de la mecánica estadística y de la mecánica cuántica

La mecánica estadística, que explica el comportamiento térmico de sistemas macroscópicos a través de las propiedades mecánicas de sus constituyentes, plantea cuestiones filosóficas radicales sobre la naturaleza del tiempo, el azar y la reducción. Casi siempre, en relación con la cuestión de la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística (*Time, Chance* and *Reduction. Philosophical Aspects of Statistical Mechanics*). La probabilidad que le caracteriza no le impide a la física estadística avanzar predicciones muy precisas sobre el comportamiento de gases, cristales, metales, plasmas, imanes y sistemas de índole semejante.

Con la introducción de conceptos probabilísticos por James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann y otros, se creó un nuevo dominio de la física teórica. Y la propia idea de probabilidad sufrió un cambió sustancial. Si antes del desarrollo de la física estadística la variación designaba una mera desviación de un valor ideal, ahora había que admitir la variación por sí misma. Pero la reflexión filosófica sobre la mecánica estadística entró muy pronto en letargo con el advenimiento de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general. En adelante y durante más de medio siglo, la filosofía se polarizó en esas nuevas teorías fundamentales (*Philosophie de la mécanique quantique*). Hablamos del neopositivismo.

Para abordar los problemas planteados por la mecánica cuántica, importa saber el modo en que la física clásica describía el mundo y qué cambios introdujo la mecánica cuántica. En mecánica clásica se estudian partículas que se mueven según trayectorias definidas. Tienen, pues, una posición. La forma en que esa posición cambia determina su velocidad; la manera en que esta velocidad cambia determina su aceleración. Las trayectorias continuas vienen condicionadas por dos factores: las fuerzas que actúan entre los cuerpos y las condiciones iniciales del sistema considerado, es decir, el estado en que se encuentra el sistema en el momento de partida. Además de las fuerzas que exigen contacto, la física clásica admite la fuerza gravitatoria, que opera a distancia, incluso a través del vacío y, en principio, de manera instantánea. Podemos formularla de manera matemáticamente precisa, introducirla en ecuaciones y deducir consecuencias sobre los movimientos de los planetas o los movimientos sobre la Tierra.

Las cosas se complican cuando se introducen las ondas, sobre todo las que se propagan en el vacío, o cuando se remplazan las fuerzas de la gravitación por restricciones geométricas, como ocurre en relatividad general. Cumplía a la física ofrecer una descripción matemática precisa, que llevara a predicciones susceptibles de ser confirmadas por la observación y la experiencia. La física clásica presentaba el mundo completamente independiente de que lo observáramos o no.

La mecánica cuántica ha dado lugar a un número espectacular de predicciones, relativas a las partículas elementales y a las estrellas o a la química del estado sólido, predicciones también ellas confirmadas por la experiencia y la observación. Y se encuentra en la base de la electrónica moderna, es decir, de la informática y las telecomunicaciones. Las técnicas derivadas de la mecánica cuántica dan cuenta del 30 por ciento del producto interior bruto de Estados Unidos.

Llámase interpretación de Copenhague a la visión tradicional de la mecánica cuántica. Suele exponerse a través de un experimento clásico: la luz —una corriente de fotones— brilla a través de dos rendijas paralelas y golpea contra una película. Si el experimento se ejecuta con detectores situados en la vecindad de cada rendija, de suerte que podamos observar el paso de las partículas luminosas, el resultado no llama la atención, pues cada fotón procede a través de una rendija o de otra, dejando dos grupos distintos de puntos indicadores del lugar donde los fotones golpean contra la película. Pero si quitamos los detectores, acontece un fenómeno insólito; sobre la película aparecen bandas claras y obscuras, de forma alternada. De ese modo se concluye que los fotones se comportan unas veces como ondas y otras como partículas. Conforme las ondas van saliendo de las rendijas, se van formando bandas luminosas en la pantalla allí donde se solapan las crestas de las ondas, y se forman bandas obscuras allí donde se cancelan un vientre y una cresta. Mientras no se coloquen detectores, seguirá apareciendo el mismo patrón de bandas, aun cuando los fotones golpeen uno a uno la pantalla.

¿Cómo pueden los fotones, los electrones y demás comportarse como ondas un instante y como partículas otro? ¿Cómo explicar que el mero acto de

observación parezca afectar a la realidad física, al menos a nivel cuántico? En la conferencia Solvay de 1927, Niels Bohr y Werner Heisenberg respondieron a tales cuestiones con una visión austera de la teoría (la interpretación de Copenhague). En ausencia de observador, declaraban, cualquier partícula existe aquí, allí y en cualquier parte, dispersa como una onda. Si se introduce un observador para medir la onda, la onda cuántica "se colapsa" en una partícula. Antes de la medición, la partícula podía describirse sólo por una ecuación que especificaba la probabilidad de hallarla en un lugar mejor que en otro. El propio acto de medición fuerza a la partícula a tomar una posición definida, única. La frontera tajante entre el mundo objetivo de "ahí fuera" y las observaciones subjetivas se difumina en esta versión de la teoría cuántica.

A diferencia de Bohr, quien consideraba que la ecuación de onda que describía una partícula era una abstracción matemática, De Broglie pensaba que tales ondas eran reales; las llamaba ondas piloto. En el modelo de De Broglie, las partículas no existían en más de un lugar a un mismo tiempo. Todas las misteriosas propiedades de la teoría cuántica se explicaban por las ondas piloto que guiaban las partículas a lo largo de las trayectorias. En el experimento de la doble rendija, cada partícula pasa a través de una rendija. La onda piloto, sin embargo, cruza a través de ambas rendijas y ejerce su efecto donde la partícula golpea la pantalla. No acontece ningún colapso de onda inexplicable e instado por la observación. Antes bien, la onda piloto total, para la partícula y los detectores considerados un solo sistema, proceden como si se produjera un colapso aparente.

David Bohm redescubrió el trabajo de De Broglie a comienzos de los años cincuenta y lo expandió. El trabajo pionero que éste realizó con su alumno Yakir Aharonov en 1959 dio como fruto el descubrimiento de lo que se denominaría efecto Bohm-Aharonov, que predecía el efecto que un flujo de inducción magnética confinado en un solenoide ejercía sobre las fases relativas de las ondas de un electrón a su paso por un lado u otro del solenoide, en regiones del espacio donde la inducción magnética era cero. Se trataba de la primera demostración de cómo un rasgo topológico no trivial del vacío podía producir efectos físicos sorprendentes. Sumábase ese hallazgo a anteriores trabajos suyos sobre oscilaciones del plasma y el comportamiento de los electrones en los metales.

Insatisfecho con la ortodoxa interpretación de Copenhague, que él había resumido con suma claridad en *Quantum Theory* (1951), Bohm publicó al año siguiente una primera entrega de lo que acabaría por denominarse la interpretación causal de la mecánica cuántica. Constituía una respuesta convincente del problema de las variables ocultas; en su propuesta, la ubicación exacta de una partícula cumplía el papel de variable oculta y las predicciones cuantomecánicas estándar se deducían al incluir un término adicional, el "potencial cuántico", en la ecuación clásica de Hamilton-Jacobi. La teoría implicaba, siguiendo a De Broglie, ondas *y* partículas, en sustitución del ortodoxo ondas *o* partículas. (En 1935, Einstein, Podolsky y Rosen propusieron que la introducción de variables ocultas era inevitable, a menos que se admitiera la existencia de acción a distancia, es decir, que fuera posible, en determinadas circunstancias, influir instantáneamente en el estado físico de ciertos cuerpos a cualquier distancia. En 1964, John Bell demostró que la introducción de variables ocultas permitiría salvar la localidad.)

Digamos cuanto antes que los problemas que plantea la mecánica cuántica no se confinan en el ámbito del razonamiento matemático, teórico, sino que pueden ser objeto de un tratamiento experimental y admiten una solución satisfactoria cuando se adoptan enfoques del estilo de los desarrollados por De Broglie o Bohm. La reticencia contra Bohm vino de sus opiniones filosóficas, que había desarrollado en paralelo a su interpretación causal. Defendía un holismo radical que a muchos les parecía misticismo oriental. Sólo en los últimos años de su vida (murió en 1992), la interpretación causal había ganado respetabilidad, merced sobre todo a la defensa que de la misma hizo Bell.

En mecánica cuántica, podemos representar matemáticamente un sistema por la "función de onda". Ese estado es un objeto matemático, sin vínculo manifiesto o directo con magnitudes más intuitivas, como podrían ser las trayectorias. Objeto que cambia en el curso del tiempo de manera precisa, en función de las interacciones entre las partículas o los campos que constituyen el sistema, según la ecuación de evolución de Schrödinger.

El vínculo entre ese estado y la experiencia arranca del hecho de que las magnitudes introducidas en física clásica (posición, velocidad, energía, momento angular) aparecen representadas en mecánica cuántica por magnitudes, abstractas también, si bien ligadas a dispositivos experimentales específicos. Existen reglas de cálculo precisas que permiten predecir, dado un estado y un dispositivo experimental correspondiente a la posición, la velocidad, etcétera, cuál será la frecuencia con que se obtendrá tal o cual resultado. Por otro lado, el estado físico del sistema cambia de manera abrupta tras la experiencia y en función del resultado obtenido al final del experimento. Esta última operación se denomina "reducción de la función de onda".

La teoría cuántica predice frecuencias de eventos. Cualquiera que sea la fase en que nos encontremos, el físico se muestra incapaz, dado un estado cuántico y determinado dispositivo experimental, de preparar el "mismo" sistema en el "mismo" estado para obtener siempre el "mismo" resultado (salvo en los casos particulares en que la función de onda es un estado propio del operador que representa la magnitud medida.) Eso no constituiría ningún problema si no se sostuviera al propio tiempo que la mecánica cuántica es completa. Lo que quiere decir que ninguna otra variable que no sea la función de onda ni debe ni puede ser introducida para describir un sistema dado de forma más detallada que lo hace la función de onda.

La primera falsa solución de los problemas de la mecánica cuántica consiste en afirmar que basta renunciar al "determinismo" y proclamar que la teoría cuántica es "indeterminista". La teoría moderna de los sistemas dinámicos (entre otras, la teoría del caos) nos ha mostrado que sistemas perfectamente deterministas pueden presentar todas las apariencias de fenómenos tan aleatorios como se quiera. El ejemplo nos indica que, si nos encontramos ante un fenómeno imprevisible, irregular, no hemos de concluir *a fortiori* que es aleatorio, es decir, que existe algún mecanismo escondido, desconocido o quizás incluso incognoscible.

De acuerdo con los postulados estándar, dado el operador energía total (el hamiltoniano) de un sistema cuántico, el estado del sistema (la función de onda) evoluciona con el tiempo de una manera determinista y predecible, según descri-

biera la ecuación de Schrödinger. Sin embargo, cuando una magnitud física —el espín, por ejemplo— "se mide", el resultado no es predecible. Si la función de onda contiene una superposición de autoestados, tales como el de espín arriba y el de espín abajo (cada uno con un definido valor de espín), entonces cada medición produce un resultado definido: o espín arriba o espín abajo. Pero la repetición de tandas experimentales produce una distribución probabilística de resultados. Las probabilidades de los resultados vienen dadas por el cuadrado del módulo del correspondiente coeficiente del autoestado en la función de onda inicial. Esa receta es la regla de Born.

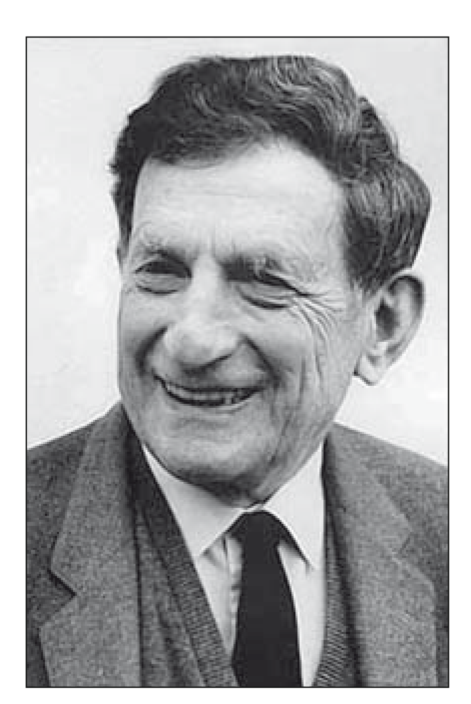
¿Cómo podemos reconciliar esa distribución probabilística de los resultados con la forma determinista de la ecuación de Schrödinger? ¿En qué consiste una medición? ¿En qué punto se rompen las superposiciones y aparecen resultados definidos? ¿Existe un criterio cuantitativo, tal como el tamaño del aparato de medición, que gobierne la transición de las superoposiciones coherentes a resultados definidos? Esos interrogantes han inspirado una abundante bibliografía en física y en filosofía.

Sea a modo de muestra el modelo de la localización espontánea continua (CSL), en que a la ecuación de Schrödinger se añade un término de ruido de movimiento browniano acoplado no linealmente a la densidad de masa local. Ese ruido es responsable del colapso espontáneo de la función de onda. La forma estándar de este modelo tiene una ecuación de evolución lineal para la matriz de densidad promediada para el ruido, que prohíbe la comunicación superlumínica. El modelo CSL tiene dos parámetros intrínsecos. Uno es el parámetro lambda (Λ), con dimensiones de inverso del tiempo, que gobierna la intensidad del ruido. El otro es una longitud, r_c, que puede interpretarse como la longitud de la correlación espacial del campo de ruido. Convencionalmente, r_c es tomado como 10^{-5} cm.

La publicación de *Physics and Chance* de Lawrence Sklar, en 1993, trajo de nuevo a primer plano las implicaciones filosóficas de la mecánica estadística. A lo largo de los últimos diez años han venido apareciendo monografías de interés en el campo, como *Time and Chance* (2000) de David Albert, y *Contemporary Debates in Philosophy of Science*, de Christopher Hitchcock (2004).

Las principales cuestiones que se debaten conciernen a la relación entre la mecánica estadística y la termodinámica. La termodinámica empezó como teoría de las máquinas de vapor. Se desarrolló gradualmente en una teoría más general que describe la materia en todas sus fases y su comportamiento térmico y magnético. La mecánica estadística se desarrolló en la esperanza de explicar las macroleyes de la termodinámica en términos del comportamiento de los componentes del sistema. La mayoría de las cuestiones fundacionales/filosóficas se hallan relacionadas de una manera u otra con la cuestión de la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística. En particular hay tres cuestiones centrales:

La termodinámica exhibe asimetría del tiempo —de acuerdo con la segunda ley, la entropía en un sistema aislado no decrece nunca con el tiempo—, mientras que las leyes de la mecánica estadística carecen de ese carácter. De manera similar, la causalidad presenta una dirección temporal. La mecánica estadística es una teoría probabilística, no así la termodinámica. ¿Cómo debe entenderse entonces el concepto de probabilidad para que sea coherente y resulte inteligible el comportamiento termodinámico? El razonamiento probabilista es esencial para la mecánica estadística, y el debate sobre los fundamentos de la mecánica estadística se centra a menudo en cómo justificar las asunciones probabilísticas particulares.



David Joseph Bohm (20 de diciembre de 1917 – 27 de octubre de 1992).

Se propone que la termodinámica se reduzca a la mecánica estadística. Pero, ¿cómo? Existen muchos significados del término reducción. La filosofía de la ciencia nos retrotrae a la exposición de Ernst Nagel sobre los criterios formales de la reducción. Nagel quería averiguar si una teoría más antigua (la teoría reducida) se reducía a su sucesora (la teoría reductora). La reducción se consideraba un caso especial de explicación deductivo-nomológica. Una reducción exitosa es la que integra la teoría más antigua en la teoría sucesora y aporta un sentido claro en el que la teoría sucesora es mejor que su predecesora. Nagel presentó la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística como caso paradigmático de una reducción exitosa.

Se distinguen varios sentidos de reducción. En primer lugar, tenemos la reducción diacrónica, la nageliana propiamente dicha, que concierne a la evolución de las disciplinas y sus teorías. Y la reducción sincrónica, que designa la relación entre dos teorías que pertenecen al mismo dominio. Esta, a su vez, se presenta en dos tipos: cuando las dos teorías en cuestión pueden relacionarse como casos límite; y cuando una teoría describe el comportamiento de sistemas compuestos (en una terminología determinada) y la otra teoría describe el comportamiento de los componentes del sistema (en una terminología diferente).

Hay quien distingue hasta cuatro tipos diferentes de estructuras diacrónicas en la evolución de las disciplinas científicas: evolución de la teoría; sustitución de una teoría por otra; absorción de una teoría en otra, y cristalización de una teoría fuera de elementos anteriores. Un ejemplo típico de cristalización es el que nos ofrece la emergencia gradual de la termodinámica fenomenológica a mediados del siglo XIX. Un papel importante lo desarrolló Rudolf Clusius.

Son muchos los filósofos de la física que se muestra reticentes a aceptar la reducción de la termodinámica en la mecánica estadística. Las magnitudes termodinámicas emergen de las magnitudes estadísticas cuando se satisfacen ciertas condiciones limitantes. Eso contrasta con la reducción en el sentido de Nagel, que exige una asociación uno a uno entre las magnitudes termodinámicas y las mecanoestadísticas. **Luis Alonso**

EN EL PROXIMO NUMERO DE JULIO 2010

Terapias con células madre,

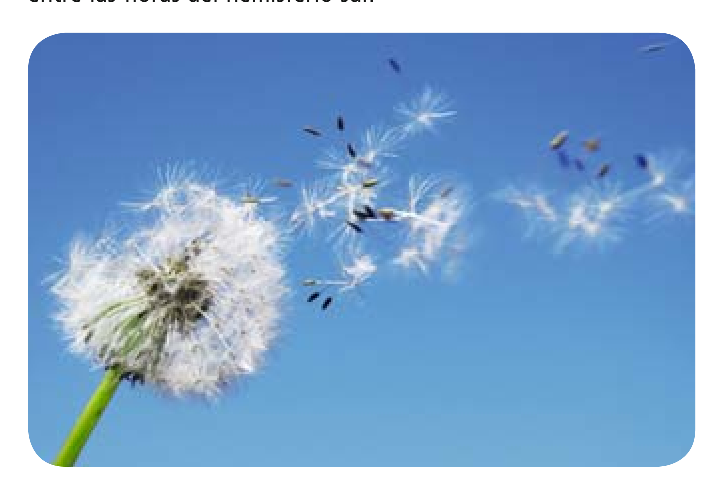
por Konrad Hochedlinger

La reprogramación de las células del propio organismo para dotarlas de la pluripotencia de las células madre embrionarias abriría nuevas vías terapéuticas y evitaría ciertas controversias.

El viento y la dispersión de las plantas,

por Angel M. Felicísimo y Jesús Muñoz

A la dispersión eólica cabe atribuir la sorprendente semejanza entre las floras del hemisferio sur.





Observación mediante neutrinos,

por Graciela B. Gelmini, Alexander Kusenko y Thomas J. Weiler

La delicada interacción entre neutrinos y materia permite explorar el interior del Sol y otros astros.

Yuca mejorada contra el hambre,

por Nagib Nassar y Rodomiro Ortiz

La tercera fuente de calorías mundial tiene el potencial de convertirse en un cultivo más productivo y nutritivo. Aliviaría la desnutrición en varios países en vías de desarrollo.

Ciegos con visión,

por Beatrice de Gelder

En invidencias por lesión cerebral no es imposible la "visión ciega", una extraordinaria capacidad de respuesta a expresiones faciales, que faculta también para esquivar obstáculos.

